Das

Durchstossen von Metallen.

Versuche und Berechnungen über den Arbeitsaufwand

und

Beobachtungen über das Verhalten der Materialien bei diesem Vorgange.

Inaugural-Dissertation

behufs

Erlangung der Doktorwürde

der

philosophischen Fakultät der Universität München

vorgelegt von

Karl Keller

Professor.

Berlin 1888.

A. W. Schade's Buchdruckerei (L. Schade)

Stallschreiber-Str. 45/46.

Sonderabdruck

aus der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure.

Jahrgang 1888, Seite 77 u. f.

Das

Durchstossen von Metallen.

Versuche und Berechnungen über den Arbeitsaufwand

und

Beobachtungen über das Verhalten der Materialien bei diesem Vorgange.

Inaugural-Dissertation

behufs

Erlangung der Doktorwürde

der

philosophischen Fakultät der Universität München

vorgelegt von

Karl Keller

Professor.

Berlin 1888.

A. W. Schade's Buchdruckerei (L. Schade)

Stallschreiber-Str. 45/46.

Behufs Feststellung des zum Lochen (Durchstofsen) von Metallen nötigen Druckes und des hieraus sich ergebenden Arbeitsaufwandes wurde bislang vielfach auf folgende Weise verfahren. Zunächst ergab sich der nötige Druck durch das Produkt aus der sogenannten Scheerfestigkeit (dem Koëffizienten der Bruchbelastung für Abscheerung) und der Anhaftungsfläche des Lochkernes (Putzen), und diese Anhaftungsfläche selbst als das Produkt von Stempelumfang und Blechdicke. In umgekehrter Reihenfolge bestimmte man wohl auch den Bruchkoëffizienten für Abscheerung durch den Quotienten des zum Durchstofsen nötigen, durch Versuche erhaltenen Höchstdruckes und der im erwähnten Sinne aufgefassten Anhaftungsfläche des Lochkernes.

Der dem vollständigen — d. h. bis zum Ausstofsen des Lochkernes durchgeführten — Durchstofsvorgang entsprechende Arbeitsaufwand wurde dann wohl auch mitunter gerechnet durch das Produkt des oben definirten Höchstdruckes und der Blechstärke, also wenn

D den Stempeldurchmesser in mm,
δ die Blechdicke in mm,
k den Bruchkoëffizienten für Abscheerung in kg/qmm,
A den Arbeitsaufwand in mkg

bezeichnet, durch die Formel:

$$A = \frac{1}{1000}(D\pi\delta)k\delta = \frac{k}{1000}D^3\pi\left(\frac{\delta}{D}\right)^2.$$

Der Wert für A war aber hiernach bei weitem zu grofs, weil ja der Höchstdruck nicht durch einen Weg gleich der Blechdicke gleichmäfsig wirkt.

Karmarsch[1]) hat daher die — eigentlich willkürliche — Annahme gemacht, dass als Weg für den Höchstdruck $(D\pi\delta)k$ nur die halbe Blechstärke einzusetzen sei, und daher für die Berechnung des Arbeitsaufwandes die Formel gegeben:

$$A = \frac{1}{1000}(D\pi\delta)k\,\frac{\delta}{2} = \frac{k}{2000}D^3\pi\left(\frac{\delta}{D}\right)^2.$$

Hartig[2]) hat in der durch ihn besorgten Neuauflage des Karmarsch'schen Werkes diese Berechnungsweise wieder aufgenommen, dabei aber allerdings erwähnt, dass nach seinen eigenen Versuchen der Arbeitsaufwand beim Durchstofsen von Eisen berechnet werden müsste nach der Formel[1]):

$$A = (0{,}25 + 0{,}0145\,\delta)\,D\pi\delta,$$

welche sich auch auf die Form bringen lässt:

$$A = 0{,}0145\,D^3\pi\left[\left(\frac{\delta}{D}\right)^2 + 17{,}2\,\frac{\delta}{D^2}\right].$$

Kick[2]) bestimmt zunächst den nötigen Druck für je 10 mm Stempelumfang und bei einer Blechdicke = 1 mm für Eisen zu 200 kg, woraus sich der im obigen Sinne aufgefasste Abscheerungsbruchkoëffizient k zu $\frac{200}{10} = 20$ rechnet, und nimmt sodann an, dass der hiernach berechnete Höchstdruck $(D\pi\delta)k = (D\pi\delta)20$ durch eine Weglänge $= {}^2/_3$ der Blechdicke wirke. Unter dieser Voraussetzung gelangt er zu der Berechnung des Arbeitsaufwandes nach der Formel:

$$A = \frac{1}{1000}(D\pi\delta)\,20\cdot{}^2/_3\,\delta = 0{,}0133\,D^3\pi\left(\frac{\delta}{D}\right)^2.$$

Endlich habe ich selbst bei Gelegenheit einer über diesen Gegenstand geführten Untersuchung[3]) die Formeln aufgestellt:

$$A = 0{,}04\,D^3\pi\left[\left(\frac{\delta}{D}\right)^2 - 0{,}21\right] \quad \text{für } \frac{D}{\delta} < 1{,}54.$$

$$A = 0{,}02\,D^3\pi\left(\frac{\delta}{D}\right)^2 \quad \text{für } \frac{D}{\delta} > 1{,}54.$$

Bei der grofsen Verschiedenheit der nach den angezogenen Formeln auszurechnenden Werte von A musste es wünschenswert erscheinen, dass durch eine gröfsere Reihe sorgfältig ausgeführter und durchgearbeiteter Versuche Klärung in die obwaltenden Verhältnisse gebracht werde, und wurde daher auch hierbei in der Weise verfahren, dass aus den Versuchen und zugehörigen Rechnungen nicht nur der höchste Arbeitsdruck und der gesammte Arbeitsaufwand folgte, sondern auch der ganze Verlauf des Vorganges in seinen einzelnen Stufen klar ersehen werden konnte. Inwieweit mir solches gelungen, dies zu entscheiden, muss ich dem Urteile meiner Fachgenossen überlassen.

---

[1]) Handbuch der mechanischen Technologie, 4. Aufl. I. Band S. 274.

[2]) Dasselbe 5. Aufl. S. 260.

[1]) Versuche über Leistung und Arbeitsverbrauch bei Werkzeugmaschinen. Leipzig 1873 S. 59.

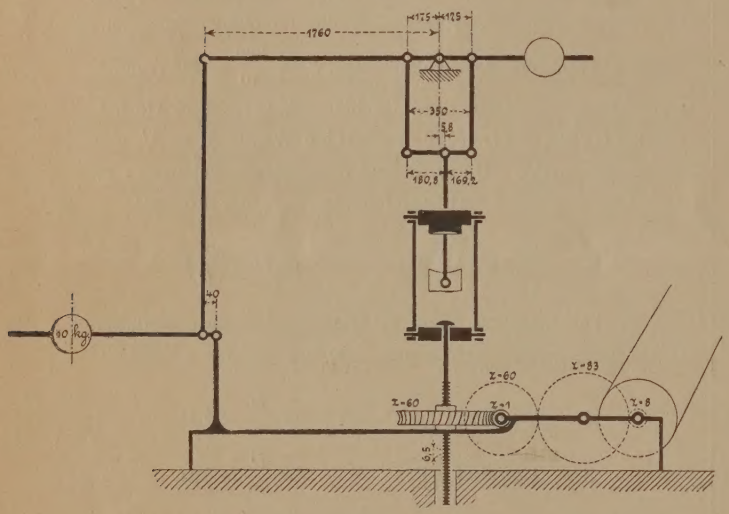
[2]) Das Gesetz der proportionalen Widerstände. Leipzig 1882 S. 65.

[3]) Zeitschrift des österr. Ingen. und Arch.-Vereines 1879 S. 163.

I. Die Versuchsvorrichtung.

Die Versuche wurden durchgeführt mit der der technischen Hochschule in Karlsruhe zugehörigen Materialprüfungsmaschine von 50 000 kg gröfster Zugkraft, geliefert von der Mannheimer Maschinenfabrik Mohr & Federhaff. Die Maschine findet sich in der Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1882 S. 545 besprochen und abgebildet; ihre Konstruktion in der für Druckversuche umgebauten Form ist durch beistehende Figur 1 schematisch dargestellt. Sie wird durch einen Otto'schen Gasmotor in Bewegung gesetzt, und zwar unter Benutzung eines Zwischenvorgeleges mit Reibungsantrieb, welches den Betrieb der Materialprüfungsmaschine mit verschiedenen Geschwindigkeiten einzuleiten gestattet.

Fig. 1.

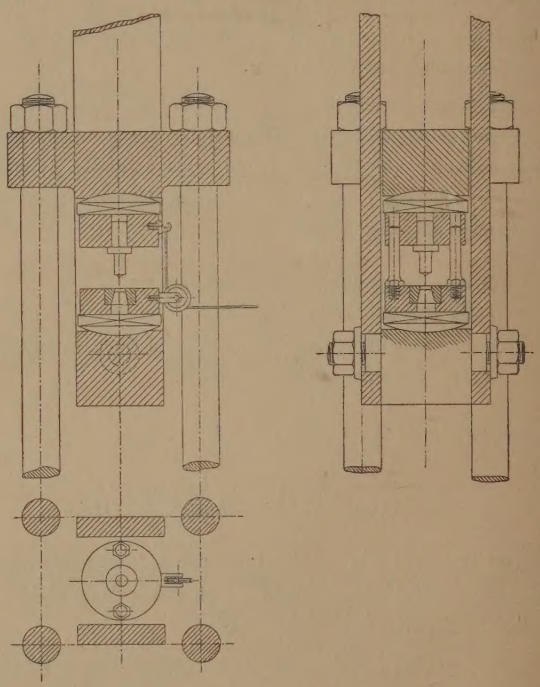


Von dem genannten Reibungsvorgelege aus wird zunächst eine Riemenscheibe an der Prüfungsmaschine, sodann durch deren Achse und 3 Zahnräder eine Schnecke in Bewegung gesetzt, welche in ein Schraubenrad eingreift. Die Nabe des letzteren ist Mutter zu einer senkrechten Schraubenspindel, deren auf- und niedergehende Bewegung sich durch 4 kräftige Schraubenbolzen auf ein Querhaupt überträgt. In der Höhe gelagert befindet sich der Wagebalken, an welchem mittels zweier kräftiger Flacheisenschienen ebenfalls ein Querhaupt hängt. Zwischen diese beiden Querhäupter wird der zu pressende Gegenstand eingelegt, und zwar behufs möglichst gleichmäfsiger Druckverteilung mit Zuhilfenahme besonders beigelegter Druckplatten, welche mit kugelförmig gebildeten Flächen in ebensolche Höhlungen der beiden Querhäupter sich einlegen. Durch Drehung des Schraubenrades wird sich somit die Spindel senkrecht abwärts bewegen; durch die vier damit verbundenen Schraubenbolzen wird das daran befestigte Querhaupt abwärts gezogen und so der zu pressende Körper zwischen die beiden Querhäupter eingeschlossen.

Von dem oberen Wagebalken, an welchem das eine Querhaupt hängt, geht eine Zugstange herab an einen zweiten unteren Wagebalken, auf welchem ein Laufgewicht verschiebbar ist. Durch dessen Stellung wird der Zug an der Schraubenspindel und somit die Pressung gemessen, welcher das Versuchsstück ausgesetzt ist.

Bei den im folgenden darzustellenden Versuchen wurde zwischen die beiden genannten Druckplatten die eigentliche kleine Versuchsvorrichtung, Fig. 2, eingeschaltet, deren Abmessungen den bez. Teilen der Prüfungsmaschine angepasst

Fig. 2.



werden mussten; sie ist zu vorliegendem Zwecke von mir eigens konstruirt worden und besteht in der Hauptsache aus 2 kreisrunden Gussstahlplatten von 120 mm Dmr. In der einen, oberen, von 50 mm Dicke ist in der Mitte der Stempel aus gehärtetem Gussstahl angebracht, der in der Platte selbst mit seinem cylindrischen Stiele gelagert ist und sich auf die Platte mit einem genügend kräftigen Bunde stützt. In der unteren, 40 mm starken Platte ist die gehärtete Stahlmatrize versenkt; die beiden Platten sind gegenseitig geführt und somit auch die wechselseitige Stellung von Stempel und Matrize durch 2 schmiedeiserne Stifte gesichert, welche in der unteren

Platte diametral befestigt sind und ihre Führung in entsprechenden Bohrungen der oberen Platte haben.

Zur Verzeichnung der gegenseitigen Stellungen und Stellungsänderungen der beiden Platten und somit auch des Stempels gegen die Matrize und gegen das zu lochende Blech dient ein an der oberen Platte eingehängtes und über eine Leitrolle an der unteren Platte geführtes Stahldrahtseilchen, welches einen senkrechten Diagrammcylinder in Drehung versetzt. Jede Aenderung in der Entfernung der beiden Platten oder jedes Fortschreiten des Stempels in dem Versuchsblech kann somit auf dem Diagrammcylinder die Verzeichnung einer wagerechten Linie veranlassen, sobald mit dem Diagrammcylinder ein Zeichenstift in Berührung gebracht wird. Da nun aufserdem dem Zeichenstift auch eine senkrechte Bewegung erteilt werden kann, welche der Verschiebung des auf dem Wagebalken beweglichen Laufgewichtes und somit dem durch die Laufgewichtsstellung bestimmten Stempeldruck proportional ist, so kann auf dem Diagrammcylinder der ganze Verlauf des Punsch- oder Durchstofsvorganges mit den jeder Stellung des Stempels entsprechenden Stempeldrucken verzeichnet werden. Durch Ausmessung der erhaltenen Diagramme kann endlich auch noch der Arbeitsaufwand erhalten werden, sobald der Mafsstab für die Stempelwege in der wagerechten und für die Stempelpressungen in der senkrechten Richtung bekannt ist. In Wirklichkeit habe ich die auf diese Weise vom Apparate selbst zu erhaltenden Diagramme nicht benutzt, und zwar aus verschiedenen Gründen. Abgesehen davon, dass der Zeichenstift sehr oft nicht genügend angriff, waren die erhaltenen Diagramme auch im Mafsstabe zu gering; ferner ergaben sich mitunter kleine Streckungen in dem Drahtseilchen, sowie auch Schwankungen in den abgerundeten Druckplatten, wodurch einzelne Diagramme verzerrt wurden. Die zur Berechnung des Arbeitsaufwandes und zur Bestimmung verschiedener anderer wichtiger und interessanter Werte nötigen Diagramme wurden durch ein besonderes, im folgenden zu beschreibendes Verfahren erhalten.

Die Uebersetzung des Antriebwerkes der ganzen Vorrichtung berechnet sich aus folgenden Angaben:

Zahnzahl des Getriebes auf der Antriebachse = 8,
» » Rades » » Schneckenachse = 60,
» » Schraubenrades = 60.

Die Schnecke hat einfaches Gewinde und die eigentliche senkrechte Arbeitsspindel eine Steigung von 6,5 mm.

Es entspricht somit einer Drehung des Schraubenrades oder einer senkrechten Verschiebung der Arbeitsspindel um die Ganghöhe eine Anzahl von $\frac{60 \cdot 60}{8}$ Umdrehungen der Antriebachse, mithin einer Verschiebung der Arbeitsspindel um 1 mm eine Drehungszahl für die Antriebachse $= \frac{60 \cdot 60}{8 \cdot 6{,}5} = 69{,}2328$. Umgekehrt kann, wie es auch im folgenden benutzt wurde, aus der Anzahl der Umdrehungen der Antriebachse auf die senkrechte Verschiebung der Spindel geschlossen werden, wenn man die Anzahl der Umdrehungen der ersteren mit 69,2328 dividirt.

2. Gewinnung des Arbeitsdiagrammes und dessen Korrektur.

Sobald — schon bei den ersten Versuchen — es sich gezeigt hatte, dass die von dem erwähnten Diagrammapparate selbst verzeichneten Arbeitsdiagramme mit den genannten Mängeln behaftet waren, stellte sich die Notwendigkeit heraus, die Diagramme auf andere Weise zu gewinnen. Da betreffs der Uebersetzung der benutzten Materialprüfungsmaschine bekannt war, dass einem Fortschreiten der Arbeitsspindel um 1 mm 69,2328 Umdrehungen der Antriebsriemenscheibe entsprechen, so konnte umgekehrt aus der in einer bestimmten Zeit gemachten Umdrehungszahl der Antriebsachse auf das in der gleichen Zeit sich ergebende Fortschreiten der Arbeitsspindel oder auf die Stellungsänderung des von der Spindel niedergezogenen Stempels gegen das zu lochende Blech geschlossen werden. Infolgedessen waren bei den Versuchen 3 gleichzeitig thätige Beobachter nötig, deren einer den unteren Wagebalken durch Verschieben des Laufgewichtes stets in der dem Gleichgewichte entsprechenden Schwebestellung zu erhalten hatte; ein zweiter hatte die jeweilige Stellung des Laufgewichtes gegen die auf dem Wagebalken angebrachte Skala zu beobachten und jedesmal, wenn der Nonius des Laufgewichtes gewisse Zahlen (z. B. die tausende der Skala) passirte, dies durch lauten Ausruf anzukündigen; in dem gleichen Augenblicke musste der 3. Beobachter den Stand des mit der Antriebachse verbundenen Umdrehungszählers aufzeichnen, wie auch die von dem vorigen ausgerufene Zahl; diese letztere war die Pressung des Stempels. Auf diese Weise erhielt man die jedem Stempeldruck entsprechende Anzahl der Umdrehungen vom Anfang des Versuches an gerechnet, und somit auch den Stempelweg gegen das zu lochende Blech; es konnten somit auch die aus Stempelweg und Pressung sich zusammensetzenden Arbeitsdiagramme verzeichnet werden. Abgelesen wurde in der Regel bei Belastungsstufen von 1000 zu 1000 kg. Es zeigte sich aber schon bei den ersten Versuchsreihen, und den hiernach konstruirten Arbeitsdiagrammen, dass das Fortschreiten des Stempels gegen das Versuchsstück und in demselben nicht mit dem nach Mafsgabe der Uebersetzung gerechneten Fortschreiten des Spindelkopfes übereinstimmte, und konnte diese Abweichung nur auf Rechnung der elastischen Deformirung der verschiedenen Teile der Prüfungsmaschine gesetzt werden. Es war demnach, ehe an die Fort-

setzung der Versuche oder auch an ihre rechnerische Verwertung gegangen werden konnte, nächste Aufgabe, das Mafs der elastischen Deformirung der Maschine zu bestimmen.

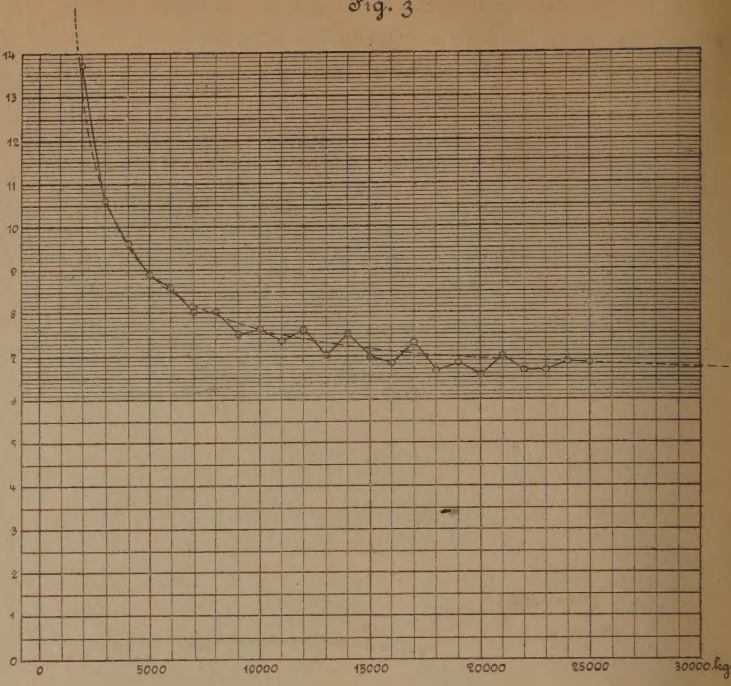
Zu diesem Zwecke wurden zwischen die beiden Druckplatten nur die beiden Gussstahlplatten, jedoch mit Weglassung des Stempels, und zwischen diese ein derartig grofses Stück Eisen gelegt, dass bei den erreichbaren Pressungen von einer Deformirung, d. h. Zusammendrückung, dieses Stückes abgesehen werden konnte; sodann wurde die Maschine langsam in Thätigkeit gesetzt. Würden die Teile der Prüfungsmaschine sich nicht oder nur unbedeutend deformirt haben, so würde die Pressung auch bei nur geringer Bewegung der Maschine sich rasch bis auf das zulässige Höchstmafs gesteigert haben; so aber ergaben sich Pressungen von 10 000, 20 000, 30 000 kg erst nach 82, 154, 222 Umdrehungen der Antriebsachse, so dass hieraus auf eine elastische Deformirung von 1,19, 2,22 bezw. 3,21 mm in der Richtung der Spindelbewegung geschlossen werden musste. Solche Versuche mussten natürlich mehrfach, sowohl vor- wie rückwärts, durchgeführt werden, einerseits, um zuverlässige Mittelwerte zu erhalten, andererseits, um festzustellen, ob die sich ergebenden Gesammtdeformirungen der verschiedenen Teile der Maschine noch vollkommen innerhalb der Elastizitätsgrenze lägen, d. h., nach Beseitigung der einwirkenden Belastungen wieder vollkommen verschwänden.

Dieses letztere, d. h. der vollkommene Rückgang der elastischen Deformirung nach Wiederentfernung der Belastung, konnte nun allerdings mit vollkommener Zuverlässigkeit erkannt werden; dagegen ergab sich wider Vermuten kein unveränderliches Verhältnis zwischen Belastungszunahme und Aenderung der Deformirung. So ergaben sich aus mehrfachen Versuchen nachstehende Umdrehungszahlen der Antriebachse für Zunahmen der Spindelbelastung von 1000 zu 1000 kg und zwar:

zwischen . .	1 000 — 2 000	2 000 — 3 000	3 000 — 4 000	4 000 — 5 000
Umdrehungen .	13,75	10,62	9,62	8,87
zwischen . .	5 000 — 6 000	6 000 — 7 000	7 000 — 8 000	8 000 — 9 000
Umdrehungen .	8,62	8,00	8,00	7,50
zwischen . .	9 000 — 10 000	10 000 — 11 000	11 000 — 12 000	12 000 — 13 000
Umdrehungen .	7,62	7,33	7,60	7,00
zwischen . .	13 000 — 14 000	14 000 — 15 000	15 000 — 16 000	16 000 — 17 000
Umdrehungen .	7,50	7,00	6,83	7,33
zwischen . .	17 000 — 18 000	18 000 — 19 000	19 000 — 20 000	20 000 — 21 000
Umdrehungen .	6,67	6,83	6,56	7,00
zwischen . .	21 000 — 22 000	22 000 — 23 000	23 000 — 24 000	24 000 — 25 000
Umdrehungen .	6,67	6,70	6,8	6,8
zwischen . .	25 000 — 26 000	26 000 — 27 000	27 000 — 28 000	28 000 — 29 000
Umdrehungen .	7,00	6,5	6,5	6,5
zwischen . .	29 000 — 30 000			
Umdrehungen .	6,00	usw.		

Trägt man nun, wie in Fig. 3, auf einem rechtwinkligen Koordinatensystem als Abscissen die Belastungen, als Ordinaten die Umdrehungszahlen von einer bis zur nächsten

Fig. 3



Tausenderbelastung auf, so ergiebt sich eine gebrochene Linie, deren mittlerer Verlauf als eine Hyperbel erkannt werden kann, welcher die Gleichung zukommt:

$$c = p\,(n - x),$$

worin c eine noch zu bestimmende Konstante,

p die höhere von 2 Belastungen einer Stufe,

n die Anzahl der Umdrehungen entsprechend einer Stufe,

x der Abstand der horizontalen Abscissenachse, von welcher aus die Umdrehungszahlen aufgetragen werden, bis zu der damit parallelen Asymptote der Hyperbel. Die andere Asymptote fällt mit der Ordinatenachse an der Stelle der Belastung 0 zusammen.

Es ergaben sich nun für diejenige Hyperbel, welche der gebrochenen Linie in Fig. 3 am nächsten kommt, die Werte

$$c = 13{,}2$$
$$x = 6{,}3.$$

Unter dieser Annahme ergeben sich nachstehende Korrekturzahlen, welche als Mafs der elastischen Deformirung der Vorrichtung von der gemäfs der Uebersetzung und der vom Anfang des Versuches aus gemachten Umdrehungszahlen gerechneten Bewegungsgröfse des Spindelkopfes abzuziehen sind, um die wirkliche Bewegungsgröfse des Stempels gegen das Versuchsstück zu erhalten. In nachstehender Tabelle I sind die Korrekturzahlen gerechnet mit bezug auf eine bei Beginn des Versuches herrschende Belastung der Spindel (Stempeldruck) = 1000 kg. Die Benutzung der Tabelle geschieht auf folgende Weise:

Ist z. B. bei Beginn des Versuches und einer Anfangsbelastung der Spindel = 1000 kg der Stand des Umdr.-Zählers 5342, später bei einer Belastung von 10000 kg sein Stand 5587, so hat während der Zunahme der Belastung von 1000 auf 10000 kg die Antriebachse 5587 — 5342 = 245 Umdr. gemacht, entsprechend einer Bewegung des Spindelkopfes um $\frac{245}{69{,}2328} = 3{,}54$ mm. Gemäfs der Tabelle I ergiebt sich aber bei einer Belastung von 10000 kg eine Korrektur von 1,19 mm gleich der elastischen Deformirung des Apparates. Der wirkliche Weg des Stempels gegen das Arbeitsstück ist mithin 3,54 — 1,19 = 2,35 mm. In dieser Weise wurden die sämmtlichen Zahlen der Versuche umgerechnet und so die mafsgebenden Punkte für die Diagramme erhalten.

Der Anfangsdruck zwischen Stempel und Arbeitsstück liefs sich nun bei den Versuchen nicht immer genau auf 1000 kg einstellen, sondern war gerade bei der Mehrzahl der Versuche teils gröfser als 1000, bis zu 2000 kg, teils kleiner, bis zu 500 kg. Es ergab sich hieraus die Notwendigkeit, die Zahlen der Tabelle I für den Fall einer anderen Anfangsbelastung als 1000 kg einer weiteren Korrektur zu unterziehen; zu diesem Zwecke dient eine auf ähnliche Weise (wie die Tabelle I)

Tabelle I zur Korrektur der Diagramme.

Belastung kg	Anzahl der Umdrehungen, gerechnet: von den nächst vorhergehenden 1000 kg	Anzahl der Umdrehungen, gerechnet: von der Anfangsspannung aus = 1000 kg	Korrektur der Stempelwege, gerechnet vom Anfang an bei einer Belastung von 1000 kg mm
2 000	12,89	12,89	0,18
3 000	10,70	23,59	0,34
4 000	9,60	33,19	0,48
5 000	8,94	42,13	0,61
6 000	8,50	50,63	0,73
7 000	8,18	58,81	0,85
8 000	7,95	66,76	0,96
9 000	7,76	74,52	1,08
10 000	7,62	82,14	1,19
11 000	7,47	89,61	1,29
12 000	7,40	97,01	1,40
13 000	7,31	104,32	1,51
14 000	7,24	111,56	1,61
15 000	7,18	118,74	1,71
16 000	7,12	125,86	1,81
17 000	7,08	132,94	1,91
18 000	7,03	139,97	2,02
19 000	6,99	146,96	2,12
20 000	6,96	153,92	2,22
21 000	6,93	160,85	2,32
22 000	6,90	167,75	2,42
23 000	6,87	174,62	2,52
24 000	6,85	181,47	2,62
25 000	6,83	188,30	2,72
26 000	6,81	195,11	2,82
27 000	6,79	201,90	2,91
28 000	6,77	208,67	3,01
29 000	6,75	215,42	3,11
30 000	6,74	222,16	3,21
31 000	6,73	228,89	3,31
32 000	6,71	235,60	3,40
33 000	6,70	242,30	3,50
34 000	6,69	248,99	3,59
35 000	6,68	255,67	3,69
36 000	6,67	262,34	3,78
37 000	6,66	269,00	3,88
38 000	6,65	275,65	3,98

Tabelle II.

Belastung kg	Anzahl der Umdrehungen, gerechnet: von den nächst vorhergehenden 100 kg	Anzahl der Umdrehungen, gerechnet: von der Anfangsbelastung = 500 kg	Korrektur der Stempelwege gerechnet vom Anfange bei einer Belastung = 500 kg mm
600	2,27	2,27	0,032
700	2,04	4,31	0,062
800	1,86	6,27	0,091
900	1,73	8,00	0,115
1000	1,62	9,62	0,139
1100	1,53	11,15	0,161
1200	1,45	12,60	0,182
1300	1,39	13,99	0,202
1400	1,33	15,32	0,221
1500	1,29	16,61	0,240
1600	1,24	17,85	0,258
1700	1,21	19,06	0,275
1800	1,18	20,24	0,292
1900	1,15	21,39	0,309
2000	1,12	22,51	0,325

entwickelte Tabelle II, welche die Korrekturen der Stempelwege, d. h. die elastischen Deformirungen, von 100 zu 100 kg enthält.

Selbstverständlich müssen die Zahlen von Tabelle I und II übereinstimmen und so z. B. die Summe der Umdrehungszahlen zwischen 1000 und 2000 in Tabelle II auch hier die in Tabelle I zu findende Zahl 12,89 ergeben, welche dort dem Anwachsen der Belastung von 1000 auf 2000 kg entspricht.

Die Benutzung von Tabelle II geschieht in folgender Weise: Ist z. B. die Anfangsbelastung bei einem Versuche = 700 kg, so ergiebt Tabelle II bei einer Belastungszunahme von 500 bis 700 kg eine Korrektur von 0,062 mm, bei einer Belastungszunahme von 500 bis 1000 kg eine Korrektur von 0,139 mm; folglich ist die Korrektur bei einer Belastungszunahme von 700 bis 1000 kg = 0,139 — 0,062 = 0,077 oder rund 0,08 mm. Diese Zahl 0,08 mm ist also als die sich zwischen 700 und 1000 kg ergebende Deformirung zu sämmtlichen in der Tabelle I enthaltenen Korrekturzahlen, d. h. zu den Deformirungen von 1000 kg an, zu addiren. War dagegen z. B. die Anfangsbelastung = 1600 kg, so ist die Korrektur oder Deformirung

	zwischen	500	und	1000 kg	=	0,139 mm
	»	500	»	1600 kg	=	0,258 »
folglich	»	1000	»	1600 kg	=	0,119 »

oder rund 0,12 mm, welcher Wert von den in Tabelle I enthaltenen Korrekturzahlen in Abzug zu bringen ist.

Neben den auf diese Weise gewonnenen Arbeitsdiagrammen wurden aber auch bei jedem Versuche die von der Maschine selbst aufgezeichneten Diagramme erhalten und die letzteren insbesondere zur Korrektur einzelner Punkte der berechneten Diagramme verwendet, an welchen augenscheinliche Fehler, wie etwa Irrtümer im Aufzeichnen der Belastungen oder Umdrehungszahlen, vorgekommen waren.

3. Material und Abmessungen der Versuchsstücke.

Da es bei den vorliegenden Versuchen nicht so fast darauf ankam, die Beschaffenheit des Materiales zu erproben, sondern mehr darauf, den Verlauf des Lochvorganges in seinen einzelnen Stufen klar zu stellen, so wurden als Versuchsstücke grofsenteils Abfallstücke von Flacheisen und Kesselblech benutzt, welche auf den beiden Breitseiten eben bearbeitet (meistens gehobelt, bei einigen auch geschliffen) waren. Die Breiten der Versuchsstücke konnten mit Rücksicht auf die Abmessungen der Versuchsvorrichtung nicht gröfser als 65 mm gewählt werden; die Längen betrugen durchweg etwa 90 mm, die Dicken zwischen 2,7 mm und 24 mm.

Die bei den Versuchen benutzten Stempel waren cylindrisch mit kleinem Körner an der Angriffsfläche; die Durchmesser der Stempel betrugen 12 mm, 15,00 (bzw. 15,05) mm, 18,0 und 20,8 mm.

4. Das Arbeitsdiagramm für den vollständig verlaufenden Durchstofsvorgang.

Die auf vorerwähnte Art konstruirten Arbeitsdiagramme, von welchen in den Tafeln I und II eine Anzahl für verschiedene Blechstärken und Stempeldurchmesser enthalten ist, haben sämmtlich den durch Figur 4 dargestellten Charakter und umfassen augenscheinlich 4 Abschnitte, welche sich zum teil ganz scharf gegeneinander abgrenzen, zum teil allerdings auch mehr oder weniger allmählich ineinander übergehen.

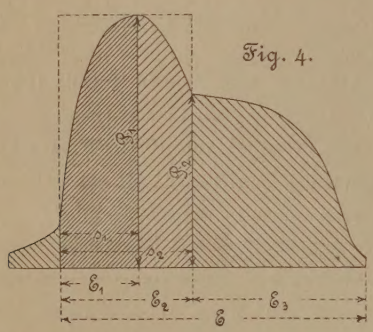


Fig. 4.

Der erste Abschnitt stellt das Eindringen des Körners dar, und ist von sehr verschiedener Länge, je nachdem der Körner von Anfang an mehr oder weniger tief in das Versuchsstück eingeschlagen war. In einzelnen Fällen, in welchen die in das Blech eingeschlagene Vertiefung den Stempelkörner aufnehmen konnte, fehlt der Körnervorgang vollständig. Bei anderen, bei welchen durch den Druck des Stempelkörners das Blech in die Matrize hinein durchgebogen wurde, ist dieser Abschnitt übermäfsig verlängert. Jedenfalls muss, wenn es sich nur um die beim Durchstofsen von Blech aufzuwendende Arbeit und um den Verlauf des eigentlichen Durchstofsvorganges handelt, von diesem ersten Abschnitt als nicht dazu gehörig abgesehen werden.

Der zweite Abschnitt umfasst die Einwirkung und das Eindringen des eigentlichen Stempels auf das Arbeitsstück bis zum Eintritte des gröfsten Widerstandes und höchsten Stempeldruckes; das Diagramm zeigt in diesem Abschnitt eine aufsteigende, anfangs nur wenig von der senkrechten abweichende gerade Linie, welche in eine parabelähnliche Kurve übergeht. An der Stelle des Höchstdruckes hat diese Kurve eine wagerechte Tangente. Während dieses Abschnittes findet keinerlei Abscheeren oder Abreifsen von Material, sondern lediglich ein Verdrängen (Dislokation) desselben statt.

Der dritte Abschnitt umfasst die weiter fortschreitende Verdrängung, während welcher der Stempeldruck rasch abnimmt und deshalb das Diagramm eine absteigende, ebenfalls parabelähnliche Begrenzungslinie zeigt, welche aber meistens steiler verläuft, als sie in dem ersten Abschnitte gegen den Höchstdruck hin sich erhoben hat. Mit dem Ende der Verdrängung, welche den zweiten und dritten Abschnitt umfasst, beginnt die Trennung des Materiales des Lochkernes von demjenigen der umgebenden Lochleibung, und somit der vierte oder Abscheerungsabschnitt. In diesem beginnt das Diagramm wieder mit einer vollständig oder nahezu geraden Linie, welche nur wenig gegen die wagerechte geneigt ist, sinkt aber später in unregelmäfsiger Weise, je nachdem die Schichten zum Bruche kommen, bis zur vollständigen Abnahme des Stempeldruckes gegen die Nulllinie herab.

Unter gewissen Bedingungen wird allerdings auch ein unvollständiger Verlauf des Durchstofsdiagrammes beobachtet, wie er später behandelt werden soll.

Da zur Feststellung der Diagramme drei von verschiedenen Beobachtern gleichzeitig anzustellende Beobachtungen notwendig waren, so sind naturgemäfs auch die Diagramme und die daraus berechneten Zahlenwerte und abgeleiteten Regeln nicht frei von Beobachtungsfehlern, infolge deren auch die in mannigfacher Beziehung sich herausstellende Gesetzmäfsigkeit mancherlei Störungen erleidet. Es musste daher auch, um diese unvermeidlichen Beobachtungsfehler möglichst unschädlich zu machen, auch die Anzahl der Versuche möglichst grofs gemacht werden; es sind daher auch 71 solcher ausgeführt und sämmtlich durchgerechnet worden. Dabei ergab sich allerdings, dass einzelne, bei welchen offenbare Fehler vorgekommen waren, ausgeschlossen werden mussten; aber aufserdem wurden behufs Ermittlung der schliefslich gewonnenen Ergebnisse die übrigen sämmtlich mit berücksichtigt, und nicht etwa blos diejenigen, welche mit einer vermuteten Regel im Einklange zu sein schienen. Die betreffenden Diagramme sind in den Tafeln I und II, die Rechnungsergebnisse und hauptsächlichsten Zahlenwerte in den Tabellen III und IV zusammengestellt. Den wesentlich von einander verschiedenen und von einander sich trennenden Abschnitten der Arbeitsdiagramme entsprechend betrachten wir im folgenden auch den ganzen Vorgang zunächst in seinen einzelnen Abschnitten und sodann erst in seiner Gesammtheit.

Tabelle III für vollständige Durchstofsdiagramme.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
No.	D	δ	$\frac{\delta}{D}$	P_1	$k=\frac{P_1}{D\pi\delta}$	s_1	$\frac{s_1}{\delta}$	$k_1=\frac{P_1}{D\pi(\delta-s_1)}$	s_2	$\frac{s_2}{\delta}$	$k_2=\frac{P_2}{D\pi(\delta-s_2)}$	c	$\frac{c}{\delta}$	$\Delta=\frac{1}{2}(D_1-D)$	$\frac{\Delta}{\delta}$
	mm	mm		kg	kg/qmm	mm		kg/qmm	mm		kg/qmm	mm		mm	
50	12,0	6,15	0,512	8 330	35,9	1,15	0,187	44,2	1,80	0,29	36,6	0,10	0,016	0,35	0,057
49	»	8,6	0,717	11 070	34,1	1,50	0,175	41,3	2,10	0,24	36,7	0,20	0,023	»	0,041
13	»	10,2	0,850	12 620	32,8	2,05	0,200	41,1	3,45	0,34	38,9	0,50	0,049	»	0,034
14	»	11,95	0,996	14 500	32,2	2,60	0,218	41,1	4,20	0,35	35,9	0,75	0,063	»	0,030
2	»	14,05	1,171	17 000	32,1	3,00	0,213	40,8	5,00	0,35	39,0	1,45	0,103	»	0,024
3	»	16,0	1,333	19 500	32,2	3,55	0,222	41,5	5,85	0,36	39,7	1,80	0,112	»	0,022
4	»	18,0	1,500	21 360	31,5	4,10	0,227	40,8	7,30	0,40	42,6	2,30	0,128	»	0,019
12	»	20,2	1,683	22 330	29,3	5,50	0,272	40,2	8,40	0,41	41,1	3,60	0,178	»	0,017
45	15,05	6,15	0,410	10 000	34,4	1,35	0,220	44,1	1,80	0,29	39,0	0,30	0,048	0,55	0,089
43	»	8,7	0,580	12 400	30,1	1,65	0,190	37,2	2,70	0,31	31,8	0,50	0,058	»	0,063
6	15,0	10,15	0,677	15 350	32,1	2,00	0,197	39,9	3,40	0,33	31,4	0,75	0,074	»	0,054
7	»	12,15	0,810	17 200	30,0	2,30	0,189	37,0	4,00	0,33	33,1	0,95	0,078	»	0,045
9	»	16,05	1,070	23 950	31,7	3,10	0,193	39,2	5,40	0,33	35,8	1,40	0,087	»	0,034
35	15,05	18,2	1,202	25 230	29,6	3,90	0,214	37,4	6,15	0,34	34,3	1,80	0,099	»	0,030
10	15,0	19,8	1,320	28 300	30,3	4,25	0,215	38,5	7,25	0,36	37,1	2,20	0,111	»	0,028
36	15,05	24,0	1,595	34 230	30,1	6,70	0,279	41,9	10,20	0,42	42,1	3,10	0,129	»	0,023
57	18,0	8,8	0,489	14 800	29,7	1,60	0,182	36,3	2,65	0,30	30,4	0,50	0,057	0,60	0,068
28	»	10,2	0,566	18 100	31,4	1,85	0,181	38,3	3,25	0,32	33,1	0,60	0,059	»	0,059
29	»	12,1	0,672	20 640	30,2	2,30	0,190	37,3	3,85	0,32	32,2	0,80	0,066	»	0,050
30	»	14,25	0,792	25 140	31,2	2,75	0,193	38,6	4,65	0,33	36,8	1,05	0,073	»	0,042
31	»	16,0	0,888	26 440	29,2	3,20	0,200	36,6	5,40	0,34	33,4	1,00	0,063	»	0,038
32	»	18,0	1,000	29 600	29,1	3,75	0,205	36,7	6,25	0,34	35,1	1,70	0,094	»	0,033
33	»	20,0	1,122	33 130	29,0	4,27	0,203	37,2	7,40	0,37	35,1	2,70	0,135	»	0,030
34	»	22,0	1,222	40 090	32,2	4,95	0,222	41,6	8,55	0,39	39,6	3,00	0,136	»	0,027
53	20,8	8,65	0,413	16 700	29,5	1,70	0,197	35,9	2,70	0,31	34,8	0,65	0,075	0,70	0,081
37	»	10,2	0,490	20 670	31,0	1,90	0,186	38,1	3,10	0,30	36,4	0,80	0,080	»	0,069
38	»	12,15	0,586	24 500	30,8	2,25	0,184	37,9	3,75	0,31	36,6	0,95	0,078	»	0,058
39	»	14,25	0,685	29 230	31,4	2,55	0,179	38,2	4,55	0,32	41,9	1,05	0,073	»	0,049
40	»	16,1	0,774	31 350	29,8	3,15	0,195	37,1	5,20	0,32	38,9	1,50	0,093	»	0,044
41	»	18,0	0,865	34 400	29,2	3,60	0,200	36,6	5,70	0,32	38,1	1,60	0,100	»	0,039
42	»	20,2	0,971	38 290	29,0	4,20	0,208	36,7	6,65	0,35	37,9	2,60	0,129	»	0,034
Mittelwerte:					31,0		0,206	39,0		0,33	36,6				

Tabelle IV für vollständige Durchstofsdiagramme.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
No.	D	δ	P_1	$A=P_1\delta$	s_1	$A_1=P_1 s_1$	E_1	$E_1:A_1$	$E_1:A$	s_2	$A_2=P_1 s_2$	E_2	$E_2:A_2$	$E_2:A$	E	$E_1:E$	$E_2:E$	$E:A$
	mm	mm	kg	mkg	mm	mkg	mkg			mm	mkg	mkg			mkg			
50	12,0	6,15	8 330	51,2	1,15	9,6	7,7	0,802	0,150	1,80	15,0	13,1	0,874	0,256	24,7	0,388	0,530	0,482
49	»	8,6	11 070	95,2	1,50	16,6	14,2	0,857	0,149	2,10	23,2	20,3	0,874	0,213	52,3	0,317	0,388	0,505
13	»	10,2	12 620	128,7	2,05	25,9	21,7	0,840	0,169	3,45	43,5	36,2	0,832	0,281	76,3	0,339	0,475	0,592
14	»	11,95	14 500	173,3	2,60	37,7	30,8	0,817	0,178	4,20	60,9	49,5	0,812	0,285	102,6	0,307	0,482	0,592
2	»	14,05	17 000	238,6	3,00	51,0	43,3	0,847	0,181	5,00	85,0	74,4	0,875	0,312	151,5	0,336	0,491	0,635
3	»	16,0	19 500	310,6	3,55	69,2	56,8	0,820	0,182	5,85	114,1	97,7	0,857	0,314	199,5	0,347	0,490	0,642
4	»	18,0	21 360	384,5	4,10	86,8	71,7	0,827	0,187	7,30	154,5	134,9	0,873	0,351	250,5	0,346	0,538	0,652
12	»	20,2	22 330	451,1	5,50	122,8	104,1	0,847	0,231	8,40	187,6	163,0	0,869	0,361	298,4	0,411	0,546	0,661
45	15,05	6,15	10 000	62,0	1,35	13,5	11,1	0,819	0,178	1,80	18,0	15,3	0,738	0,247	25,1	0,537	0,609	0,405
43	»	8,7	12 400	107,9	1,65	20,5	16,0	0,781	0,148	2,70	33,5	27,3	0,815	0,253	51,3	0,399	0,532	0,475
6	15,0	10,15	15 350	155,8	2,00	30,7	25,0	0,814	0,160	3,40	52,2	42,7	0,817	0,273	76,5	0,401	0,557	0,491
7	»	12,15	17 200	209,0	2,30	39,6	33,4	0,849	0,160	4,00	68,8	58,9	0,855	0,281	105,8	0,374	0,556	0,507
9	»	16,05	23 950	384,4	3,10	74,2	62,0	0,835	0,161	5,40	129,3	110,3	0,849	0,287	224,2	0,331	0,492	0,583
35	15,05	18,2	25 230	456,7	3,90	98,4	80,0	0,813	0,175	6,15	155,2	129,7	0,835	0,284	296,5	0,332	0,523	0,649
10	15,0	19,8	28 300	560,3	4,25	120,3	101,0	0,839	0,180	7,25	205,2	171,7	0,837	0,305	343,3	0,350	0,500	0,612
36	15,05	24,0	34 230	821,5	6,70	229,3	191,0	0,833	0,232	10,20	349,1	301,1	0,862	0,366	523,2	0,438	0,575	0,637
57	18,0	8,8	14 800	130,2	1,60	23,7	18,9	0,796	0,145	2,65	39,2	31,9	0,814	0,245	63,6	0,372	0,501	0,488
28	»	10,2	18 100	184,6	1,85	33,5	27,2	0,811	0,147	3,25	58,8	49,0	0,833	0,265	91,5	0,366	0,535	0,495
29	»	12,1	20 640	249,7	2,30	47,5	38,9	0,818	0,156	3,85	79,5	67,8	0,853	0,271	133,7	0,355	0,507	0,536
30	»	14,25	25 140	358,2	2,75	69,1	57,3	0,828	0,160	4,65	116,9	99,8	0,853	0,278	199,9	0,346	0,499	0,558
31	»	16,0	26 440	423,0	3,20	84,6	69,4	0,821	0,164	5,40	142,8	120,1	0,842	0,284	244,2	0,346	0,492	0,577
32	»	18,0	29 600	532,8	3,75	110,0	91,5	0,824	0,172	6,25	185,0	156,2	0,844	0,293	317,8	0,346	0,491	0,596
33	»	20,0	33 130	669,2	4,27	141,5	117,3	0,829	0,175	7,40	245,2	203,5	0,830	0,304	401,8	0,352	0,506	0,600
34	»	22,0	40 090	882,0	4,95	198,4	164,2	0,828	0,186	8,55	342,8	286,2	0,835	0,324	532,2	0,373	0,538	0,604
53	20,8	8,65	16 700	144,4	1,70	28,4	21,5	0,758	0,149	2,70	45,1	36,1	0,801	0,250	75,1	0,378	0,481	0,520
37	»	10,2	20 670	210,8	1,90	39,3	32,2	0,819	0,152	3,10	64,1	53,5	0,834	0,253	103,3	0,380	0,518	0,490
38	»	12,15	24 500	297,7	2,25	55,1	45,0	0,816	0,151	3,75	91,9	76,5	0,832	0,257	152,9	0,360	0,500	0,514
39	»	14,25	29 230	416,5	2,55	74,5	60,6	0,813	0,146	4,55	133,0	111,8	0,840	0,268	224,1	0,333	0,499	0,538
40	»	16,1	31 350	504,7	3,15	98,7	82,2	0,815	0,163	5,20	163,0	137,8	0,845	0,273	280,5	0,352	0,491	0,556
41	»	18,0	34 400	619,2	3,60	123,8	101,0	0,815	0,163	5,70	196,1	165,0	0,841	0,266	346,1	0,358	0,477	0,559
42	»	20,2	38 290	773,5	4,20	160,8	132,9	0,826	0,171	6,65	215,6	215,6	0,847	0,279	454,8	0,354	0,474	0,588
Mittelwerte:								0,821					0,839			0,367	0,509	

a) Erster Abschnitt des Durchstofsvorganges: vom Beginne der Einwirkung des Stempels bis zum Eintritte der Höchstpressung.

Wenn sich im Diagramm ein besonderer, der Einwirkung des Körners entsprechender Abschnitt abhebt, so beginnt der vorliegende Abschnitt des Durchstofsvorganges mit einer Stempelpressung von 2000 bis 4500 kg, welche dem letzten Augenblicke der Einwirkung des Körners entspricht; ist ein solcher »Körner«-Abschnitt im Diagramme nicht vorhanden, so beginnt der vorliegende Abschnitt mit der Stempelpressung = 0. Zunächst nun zeigt das Diagramm eine von der senkrechten wenig abweichende gerade Linie; hieraus folgt, dass die Zunahme von Eindringtiefe und Widerstand (d. h. Stempeldruck) proportional, dass somit dieser Teil der Formänderung innerhalb der Elastizitätsgrenze erfolge; doch kann diese nicht als eine Elastizitätsgrenze auf Schub oder Druck, sondern nur allgemein als eine solche auf Verschiebung des Materiales (Dislokation) bezeichnet werden. Zur Bestimmung eines inbezug auf diese Gesammtformänderung, die sich aus einer Zusammendrückung und einer seitlichen Verdrängung zusammensetzt, giltigen Elastizitätsmoduls könnte möglicherweise der einer Zunahme der Belastung um je 1000 kg entsprechende Stempelweg benutzt werden; doch bewegt sich dieser zwischen sehr weiten Grenzen, zwischen 0,01 und 0,11 mm; in bei weitem den meisten Fällen findet er sich in der Nähe des arithmetischen Mittelwertes 0,04 mm. Eine Abhängigkeit dieses Stempelweges von den Abmessungen der Versuchsstücke und des Stempels konnte aber nicht erkannt werden, während allerdings die ganze Dauer der innerhalb der Elastizitätsgrenze liegenden Formänderung, d. h. die Ausdehnung des geradlinig aufsteigenden Teiles des Diagrammes, mit der Blechdicke und mit dem Stempeldurchmesser zunimmt.

Von der Stelle an, wo sich die Diagrammlinie krümmt, ist natürlich die Elastizitätsgrenze überschritten, und ist beim Eintreten der Höchstpressung schon ein sehr bedeutendes Eindringen s_1 des Stempels in das Arbeitsstück wahrzunehmen; gleichzeitig ergiebt sich auch an der Unterseite des letzteren ein in die Matrizenöffnung hineinragender Austritt von Material. Beide Deformirungen, die durch den Stempel hervorgebrachte Vertiefung oben und der Hervortritt von Material unten, gehen nach Wegnahme der Belastung nicht mehr zurück; doch sind beide nur Erfolg der Materialverdrängung, nicht etwa einer Abscheerung, wie sich an Aetzungen wahrnehmen lässt, welche an den gut geschliffenen Schnittflächen der Versuchsstücke zahlreich hergestellt wurden [1]). An allen Aetzungen zeigen sich nur gebogene Schichten, aber keinerlei Risse in der Richtung der schliefslichen Abscheerungsfläche. Aus der Thatsache, dass die Vertiefung auf der oberen Seite stets gröfser ist als das Hervortreten des Materiales auf der unteren Seite, ergiebt sich ferner, dass eine nicht unbedeutende Menge des Materiales seitlich abgedrängt wurde.

Aus der Höchstpressung P_1 und den Abmessungen von Versuchsstück und Stempel auf die sogenannte Abscheerungsspannung zu schliefsen, würde demnach unrichtig sein, da die Anhaftungsfläche in diesem Augenblick nicht mehr $= D\pi\delta$, sondern $= D\pi(\delta - s_1)$ ist, und somit, wenn man eine gleichmäfsige Verteilung der Pressung P_1 längs der Anhaftungsfläche annimmt, sich jene Spannung rechnet durch

$$k_1 = \frac{P_1}{D\pi(\delta - s_1)},$$

während diese früher gerechnet wurde mit

$$k = \frac{P_1}{D\pi\delta}.$$

Aus den Versuchen wurden beide Werte bestimmt, und zwar im mittel

$$k = 31{,}0$$
$$k_1 = 39{,}0 = 1{,}26\,k.$$

Die während dieses ersten Abschnittes verrichtete Arbeit E_1 ist dargestellt durch den Teil der Diagrammfläche, welcher begrenzt ist durch das konstruirte Diagramm, durch die wagerechte 0-Linie der Belastungen und die Senkrechte, welche dem Eintritt des Höchstdruckes entspricht.

Der Augenblick des Eintrittes des Höchstdruckes konnte durch die Versuche unmittelbar allerdings nicht erhalten, dagegen derjenige Augenblick mit grofser Sicherheit verzeichnet werden, in welchem der kurze Zeit andauernde Höchstdruck sich zu vermindern beginnt. Der eigentliche Augenblick für den Eintritt dieses Druckes konnte erst nach Verzeichnung der Diagramme schätzungsweise eingetragen werden; doch war dies — bei dem grofsen Mafsstabe der Diagramme (10 mm = 1 mm in der ursprünglichen Zeichnung derselben) — mit grofser Zuverlässigkeit möglich.

Vergleicht man die Arbeit E_1, welche durch Ausmessung der Diagrammfläche erhalten wurde, mit jener Arbeit A_1 welche verrichtet würde, wenn der Höchstdruck P_1 durch die ganze Weglänge s_1 konstant wirkte, also mit der Arbeit $A_1 = P_1 s_1$, so zeigt sich, dass das Verhältnis $\frac{E_1}{A_1}$ ein nahezu unveränderliches ist, nämlich im mittel $\frac{E_1}{A_1} = 0{,}321$.

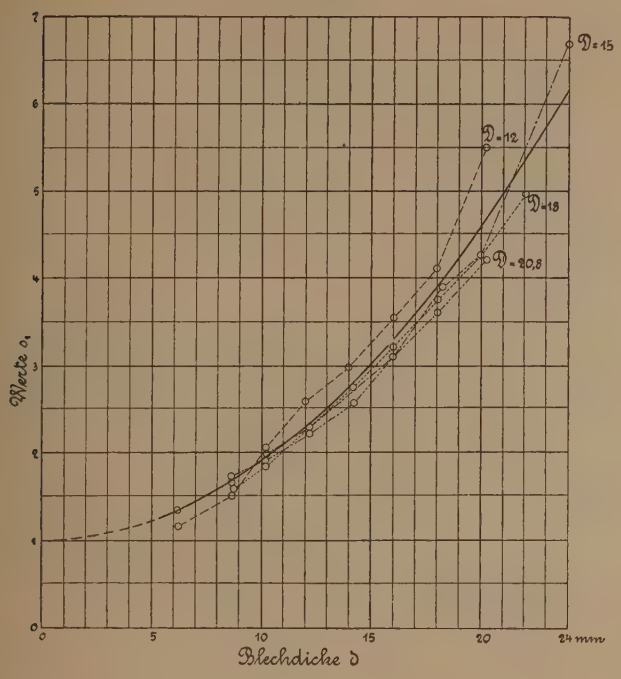
[1]) Siehe meinen Aufsatz in der Zeitschrift des österr. Ing.-Ver. 1879 S. 163.

Somit erhielte man zur Berechnung des Arbeitsaufwandes während dieses ersten Abschnittes die Gleichung

$$E_1 = 0{,}821\, P_1 s_1 = 0{,}821 \cdot k \cdot D\pi\delta s_1.$$

Vergleicht man ferner die Arbeit E_1 mit derjenigen, welche der Wirkung von P_1 durch die ganze Blechdicke δ entsprechen würde, also mit der Arbeit $A = P_1\delta$, so erhält man für das Verhältnis $\frac{E_1}{A}$ Werte, welche in ihrer Veränderlichkeit eine eigentümliche Gesetzmäfsigkeit ergeben, nämlich mit zunehmender Blechstärke zu- und mit zunehmendem Stempeldurchmesser abnehmen. Die Werte $\frac{E_1}{A}$ sind in der Tabelle IV verzeichnet.

Fig. 5.



Die Eindringtiefe s_1 im Augenblicke des Eintrittes des Höchstdruckes ist bei gröfseren Stempeldurchmessern nahezu in unveränderlichem Verhältnisse zur Blechstärke; bei kleineren Stempeldurchmessern aber ist das Verhaltnis $\frac{s_1}{\delta}$ mit der Blechdicke veränderlich, und zwar ist die Abhängigkeit zwischen s_1 und δ durch das Diagramm Fig. 5 dargestellt; sie lässt sich ausdrücken durch die Gleichung:

$$s_1 = 0{,}9\text{ mm} + 0{,}01\,\delta^2;$$

als durchschnittlicher Mittelwert kann angesehen werden:

$$s_1 = 0{,}206\,\delta.$$

Mit diesem Mittelwert würde die Formel zur Berechnung des Arbeitsaufwandes in diesem ersten Abschnitte lauten

$$\begin{aligned} E_1 &= 0{,}821 \cdot k \cdot D\pi \cdot 0{,}206\,\delta \\ &= 0{,}169\, k D\pi\delta \\ &= 0{,}169\, k D^3\pi \left(\frac{\delta}{D}\right)^2 \text{ und mit } k = 31 \\ E_1 &= 5{,}26\, D^3\pi \left(\frac{\delta}{D}\right)^2 \text{ in kgmm} \\ &= 0{,}0053\, D^3\pi \left(\frac{\delta}{D}\right)^2 \text{ in kgm.} \end{aligned}$$

b) Zweiter Abschnitt: vom Beginne der Einwirkung des Stempels bis zum Ende des Verdrängungsvorganges.

Das Ende des Verdrängungsvorganges ist derjenige Augenblick, in welchem die Verminderung der Höhe des Lochkernes ihre Grenze erreicht hat, und von welchem an nur noch ein Herausdrücken des Lochkernes erfolgt, der aber selbst sich dann in seiner Höhe nicht mehr ändert. Die Bestimmung dieser Grenze ist für die Bestimmung der Zeitdauer des eigentlichen Abscheerungsvorganges vom gröfsten Werte, und lässt sich diese Grenze bei einer grofsen Anzahl von Diagrammen ganz genau wahrnehmen. Es ist dies der Punkt, in welchem die vom Höchstdrucke ziemlich steil abfallende Linie mit einer nur wenig geneigten Linie zusammenstöfst. Bei einzelnen Diagrammen war ein solcher Punkt unmittelbar nicht wahrzunehmen; er musste durch die Kreuzung der Richtungen der steil abfallenden Diagrammlinie mit der schwach geneigten Linie konstruirt werden. Bis an diese Grenze ist der Lochkern in ungestörtem Zusammenhange mit dem umgebenden Materiale geblieben, und keinerlei Riss oder Verletzung des Materiales in der Richtung der schliefslichen Abscheerungsfläche wahrnehmbar.

Bis zu jener Grenze ist der Stempel um den Weg s_2 im Bleche vorwärts gegangen, und hat sich damit die Anhaftungsfläche des Lochkernes auf die Höhe $(\delta - s_2)$ vermindert. Unter Voraussetzung gleichmäfsiger Verteilung der an jener Grenze stattfindenden Stempelpressung über die ganze Anhaftungsfläche des Lochkernes ergiebt sich somit hier eine Intensität der Schubspannung

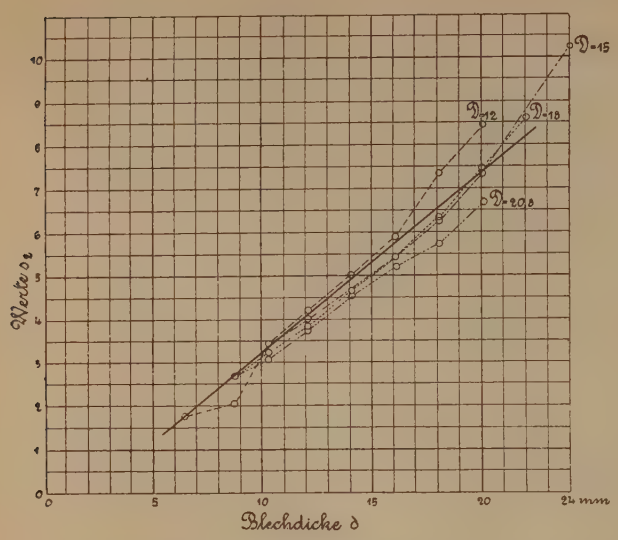
$$k_2 = \frac{P_2}{D\pi\,(\delta - s_2)}.$$

Die aus den Versuchen sich ergebenden Werte k_2 sind natürlich schon wegen der unvermeidlichen Verschiedenheit im Materiale der Versuchsbleche, sodann aber auch wegen der oftmals nur schätzungsweisen Bestimmung dieser Grenze und wegen mancher Beobachtungsmängel nicht unveränderlich, weichen aber doch nur wenig von dem arithmetischen Mittelwerte $k = 36{,}6$ kg ab,

$$= 0{,}94\, k_1 = 1{,}18\, k.$$

Die Eindringtiefe am Ende des Verdrängungsabschnittes s_2 ist in ihrem Verhältnisse zur Blechstärke bei gröfseren Stempeldurchmessern nahezu unveränderlich, bei kleineren wenig veränderlich, und zwar dargestellt in dem Diagramm Fig. 6.

Fig. 6.



Der mittlere Verlauf der Linien lässt sich darstellen durch die Gleichung

$$s_2 = 0{,}4\,\delta - 0{,}6 \text{ mm},$$

mit dem durchschnittlichen Werte aus den Versuchen

$$s_2 = 0{,}33\,\delta.$$

Die ganze Verdrängungsarbeit ist dargestellt durch die Fläche, welche begrenzt ist durch das konstruirte krummlinige Diagramm, durch die wagerechte 0-Linie der Belastung und die Senkrechte im Abstande s_2 vom Anfange des Diagrammes.

Vergleicht man die durch Ausmessung dieser Diagrammfläche erhaltene Arbeit E_2 mit derjenigen A_2, welche dem Höchstdrucke P_1 bei einer Weglänge s_2 entsprechen würde, also mit der Arbeit $A_2 = P_1 s_2$, so erhält man für das Verhältnis $\frac{E_2}{A_2}$ einen nahezu unveränderlichen Wert 0,839, mithin mit den obigen Mittelwerten die Arbeitsgleichung für diesen Abschnitt

$$\begin{aligned} E_2 = 0{,}839\, P_1 s_2 &= 0{,}839 \cdot k\, D\, \pi\, \delta \cdot 0{,}33\, \delta \\ &= 0{,}28\, k\, \pi\, D\, \delta^2 \\ &= 0{,}28\, k\, \frac{D^3 \pi}{2} \left(\frac{\delta}{D}\right)^2 \\ &= 8{,}7\, D^3 \pi \left(\frac{d}{D}\right)^2 \text{ in kgmm} \\ &= 0{,}0087\, D^3 \pi \left(\frac{d}{D}\right)^2 \text{ in kgm.} \end{aligned}$$

Vergleicht man diese Arbeit E_2 ferner mit derjenigen A, welche dem Höchstdrucke P_1 bei einer Weglänge = der Blechdicke entsprechen würde, also mit der Arbeit $A = P_1 \delta$, so erhält man für das Verhältnis $\frac{E_2}{A}$ Werte, welche, wie jene Werte $\frac{E_1}{A}$, dieselbe Gesetzmäfsigkeit zeigen, d. h. mit zunehmender Blechstärke zu- und mit zunehmendem Stempeldurchmesser abnehmen.

Als Mafs für die Verdrängung des Materiales kann der Grad der scheinbaren Zusammendrückung oder Höhenverminderung des Lochkernes angesehen werden, insbesondere das Verhältnis $\frac{c}{\delta}$; bei ganz geringen Blechstärken ist eine messbare Zusammendrückung nicht wahrzunehmen, bei der Blechstärke der vorliegenden Versuchsreihe beträgt sie höchstens 3,6 mm (siehe Tabelle III), bei einer früheren Reihe von Versuchen ergaben sich nachstehende Werte:

δ =	14,5	18,0	21,0	23,0	45,0 mm
D =	13,5	13,0	13,0	13,5	11,0 mm
c =	0,8	2,0	3,0	4,5	27,0 mm.

Das verdrängte Material ist zur Seite und namentlich gegen die untere Fläche des Versuchsstückes ausgewichen, wodurch sich bei verhältnismäfsig geringem Abstande des durchgestofsenen Loches von dem Rande eine Aenderung der Kantenwinkel ergab; bei gröfserer Entfernung vom Rande erfolgte überhaupt eine Streckung (Vergröfserung) der unteren Fläche, somit eine Biegung. Die Thatsache, dass ein Flacheisenstab, in welchen der Länge nach eine Anzahl Löcher gestofsen werden, länger wird, ist bekannt und nur aus der Verdrängung des Materiales zu erklären.

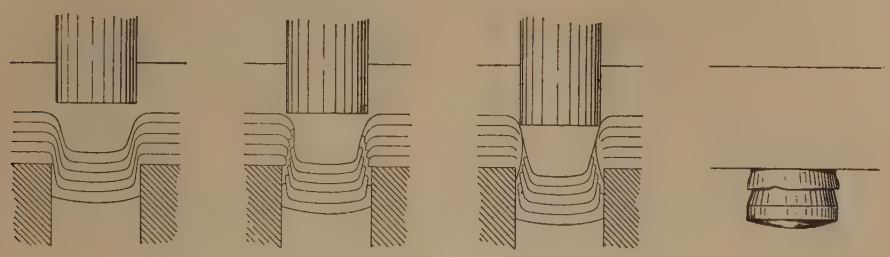
c) Dritter Abschnitt: vom Ende des Verdrängungsabschnittes bis zum Ende des Durchstofsvorganges.

Wie in dem mehrfach erwähnten früheren Aufsatze gezeigt wurde, geschieht die Abtrennung des Lochkernes von dem umgebenden Materiale nicht durch eigentliche Abscheerung, sondern durch Abreifsen der stark gebogenen und gedehnten Schichten, und zwar beginnt der vorliegende 3. Abschnitt zunächst mit einer Dehnung der Schichten. Aus der eigentümlichen geradlinigen Form des Diagrammes am Anfange dieses Abschnittes möchte wegen der Proportionalität zwischen Belastungsänderung und Stempelverschiebung zunächst auf eine Dehnung innerhalb der Elastizitätsgrenze geschlossen werden; bald aber wird das Diagramm unregelmäfsig und sinkt oft je nach der mehr oder weniger ausgesprochenen Schichtung des Materiales stufenweise zur 0-Linie herab.

Eigentümlich ist hierbei auch die jederzeit sich ergebende

konische Form des heraustretenden Lochkernes, welche sich nur auf folgende Weise erklären lässt (siehe Fig. 7). Zunächst erfolgt das Abreifsen der untersten, um den scharfen Rand der Matrize gebogenen Schicht, wodurch der zurückbleibende Teil der abgerissenen Schicht einen scharfkantigen Rand bei geringer Verengerung der Matrizenöffnung bildet. Um diesen scharfen Rand biegt sich sodann die folgende Schicht und verengert wieder die Durchgangsöffnung, das heifst die kreisförmige Kante, an welcher die darauf folgende Schicht reifst, und infolge dessen tritt der Lochkern mit nach oben verjüngtem Durchmesser heraus. Da der in die Matrizenöffnung hineinragende Teil der Schichten aber immer noch

Fig. 7.



der Stempelpressung unterliegt, so wird er in den freien Raum der Matrizenöffnung hineingepresst (der vollkommene Vorgang des Abfliefsens fester Körper unter Druck) und bildet so die eigentümliche ringsumlaufende schneidige Schicht, welche den konischen Teil des Lochkernes umgiebt. Bei gröfseren Blechdicken zeigen sich manchmal zwei, sogar drei aufeinander folgende konische Teile des Lochkernes; nur sind die oberen weniger auffallend, als der unterste.

Was die Spannung längs der Anhaftungsfläche des Lochkernes betrifft, so ist sie — k_3 — unter Voraussetzung gleichmäfsiger Verteilung, bei einzelnen Versuchen nahezu unveränderlich durch den ganzen dritten Abschnitt hindurch, bei den meisten aber bleibt der gesammte Stempeldruck eine Zeit lang nahezu unveränderlich, während der Stempel im Blech vorwärts schreitet; es nimmt daher die Intensität der Schubspannung erheblich zu, und zwar bis zum $1^1/_2$fachen Werte von k_2 am Anfange dieses und am Ende des vorigen Abschnittes. Auf diesem Werte erhält sich dann die Intensität der Schubspannung durch eine gröfsere Strecke des Stempelweges, und sinkt erst zuletzt, wenn der Lochkern schon von dem umgebenden Materiale getrennt ist, auf 0 herab.

Versucht man unter Annahme eines unveränderlichen Wertes k_3 die Arbeit E_3 während dieses letzten Abschnittes zu rechnen, so ist zunächst für eine Eindringtiefe σ des Stempels

die Anhaftungsfläche . . . . . $= D\pi(\delta - \sigma)$
der Stempeldruck . . . . . $= k_3 \cdot D\pi(\delta - \sigma)$
die Arbeit während des Weges $d\sigma$ $= k_3 D\pi(\delta - \sigma)\, d\sigma$
die ganze Arbeit während dieses Abschnittes E_3 . . . . . $= \int k_3 D\pi(\delta - \sigma)\, d\sigma.$

Hieraus ergiebt sich mit den Grenzwerten $\sigma = \delta$ und $\sigma = s_2$

$$E_3 = k_3 D\pi(\delta\sigma - {}^1/_2\,\sigma^2)_{\sigma = s_2}^{\sigma = \delta}$$

und mit dem im vorigen Abschnitte festgesetzten Mittelwert

$$s_2 = 0{,}4\,\delta - 0{,}6$$

nach kleiner Umformung

$$E_3 = k_3 D\pi(0{,}18\,\delta^2 + 0{,}36\,\delta + 0{,}18) = k_3 D\pi \cdot 0{,}18\,(\delta + 1)^2$$

oder

$$\frac{E_3}{D(\delta+1)^2} = 0{,}18\,k_3\,\pi = \text{konst.}$$

Bestimmt man diese Gröfse aus den Versuchen, d. h. mit Hilfe der durch Ausmessung der Diagramme erhaltenen Werte E_3 und der Abmessungen D und δ, so erhält man natürlich eine Reihe von Werten, welche nicht vollkommen unveränderlich sind, aber doch nicht weit von dem Mittelwerte $\frac{E_3}{D(\delta+1)^2} = 0{,}23$ abliegen.

Mit diesem Werte ergäbe sich dann der Wert der als unveränderlich angenommenen Schubspannung k_3 in diesem Abschnitte

$$k_3 = \frac{0{,}23}{0{,}18 \cdot \pi} = 40{,}7 = 1{,}31\,k = 1{,}04\,k_1 = 1{,}11\,k_2.$$

Da aber, wie schon erwähnt, der Wert der Schubspannung k_3 nicht bei allen Versuchen sich unveränderlich ergiebt, auch der Quotient $\frac{E_3}{D(\delta+1)^2}$ bei kleineren Blechdicken geringere Werte zeigt, als bei gröfseren, so wurde der Gleichung für E_3 die Form gegeben

$$E_3 = 0{,}18\,k_3\,D^3\pi\left(\frac{\delta+1}{D}\right)^2,$$

wofür

$$E_3 = a\,D^3\pi\left[\left(\frac{\delta}{D}\right)^2 + b\right]$$

gesetzt werden kann.

Die Bestimmung der beiden Konstanten a und b erfolgt im nächsten Abschnitte.

d) Vierter Abschnitt: Das ganze Arbeitsdiagramm für den vollständig verlaufenden Durchstofsvorgang.

Wird zunächst die durch Ausmessung der vollständigen Diagramme erhaltene Gesammtarbeit E in Vergleich gesetzt mit derjenigen A, welche dem Höchstdruck P_1 bei einer Weglänge gleich der ganzen Blechdicke δ entsprechen würde, so erhält man wieder für das Verhältnis $\frac{E}{A}$ Werte, welche dieselbe Gesetzmäfsigkeit zeigen wie die Werte von $\frac{E_1}{A}$ und $\frac{E_2}{A}$, d. h., sie nehmen mit zunehmender Blechstärke zu und mit zunehmendem Stempeldurchmesser ab.

Der Vergleich des Gesammtarbeitsaufwandes mit dem Arbeitsaufwand in den einzelnen Abschnitten ergiebt ziemlich unveränderlich die Beziehungen

$$E_1 = 0{,}367\, E,$$
$$E_2 = 0{,}509\, E,$$
$$E_3 = 0{,}491\, E,$$

wobei insbesondere die beiden letzten Verhältnisse von Interesse sind, indem sie zeigen, dass bei dem Materiale der Versuchsstücke gerade die Hälfte der aufgewendeten Arbeit auf die Verdrängung des Materiales, und die andere Hälfte auf die eigentliche Abscheerung verwendet wurde. Es muss hieraus geschlossen werden, dass auch die Gesammtarbeit passend durch eine Gleichung ausgedrückt werden könnte von der Form

$$E = A\, D^3\, \pi \left[\left(\frac{\delta}{D} \right)^2 + B \right],$$

worin die Konstanten A und B nach den angestellten Versuchen bestimmt werden müssten. Man setzt deshalb zunächst

$$B = \frac{E}{A\, D^3\, \pi} - \left(\frac{\delta}{D} \right)^2 = \frac{M}{A} + N$$

und bestimmt aus 2 Versuchen, für welche E, D und δ bekannt sind, die Werte

$$M_1 = \frac{E}{D^3\, \pi} \text{ und } N_1 = \left(\frac{\delta}{D} \right)^2 \text{ bezw. } M_2 \text{ und } N_2.$$

Man hat somit 2 Gleichungen mit 2 Unbekannten

$$B = \frac{M_1}{A} + N_1 \text{ und } B = \frac{M_2}{A} + N_2,$$

woraus

$$A = \frac{M_1 - M_2}{N_1 - N_2}$$

folgt. Um nun zu einem zuverlässigen Mittelwert zu gelangen, sollten eigentlich alle gemachten Versuche berücksichtigt werden, woraus bei 42 hierfür tauglichen Versuchen $\frac{42 \times 41}{2} = 861$ Paare von Gleichungen sich ergeben würden. Da nun aber, wie sich zeigt, unter 8 mm Blechdicke kein vollständiger Durchstofsvorgang mehr stattfindet, mussten zunächst alle Versuche mit kleineren Blechdicken ausgeschlossen werden, desgleichen eine Anzahl derselben mit entweder bekannten oder doch aus den Diagrammen zu vermutenden Beobachtungsfehlern, so dass schliefslich nur noch 17 Versuche gewählt wurden, aus welchen sich 136 verschiedene Werte von A und B ergaben.

Die Werte von A sind nicht sehr viel von dem arithmetischen Mittelwerte $A = 0{,}0203$ verschieden. Dagegen zeigten die Werte von B, welchen allerdings ein Durchschnittswert $B = -0{,}065$ entspricht, so grofse Abweichungen von diesem Durchschnittswerte, dass es rätlich erscheinen musste, die Konstante B noch besonders zu bestimmen, und zwar, indem zunächst in die Arbeitsgleichung

$$E = A\, D^3\, \pi \left[\left(\frac{\delta}{D} \right)^2 + B \right]$$

der Wert $A = 0{,}0203$ eingesetzt und danach für jeden Versuch B berechnet wurde. Die sich ergebenden Werte von B zeigten eine so merkwürdige Abhängigkeit von $\left(\frac{\delta}{D} \right)$, was besonders bei ihrer Aufzeichnung in einem Diagramme sich ergab, dass dafür die Gleichung aufgestellt werden konnte

$$B = 0{,}01 - 0{,}14\, \frac{\delta}{D}.$$

Es lautet somit die fertige Arbeitsgleichung:

$$E = 0{,}0203\, D^3\, \pi \left[\left(\frac{\delta}{D} \right)^2 - 0{,}14 \left(\frac{\delta}{D} \right) + 0{,}01 \right] \text{ kgm.}$$

Mit Berücksichtigung dieser Gleichung und der oben gefundenen Werte für die Verhältnisse $\frac{E_1}{E}$, $\frac{E_2}{E}$, $\frac{E_3}{E}$ ergiebt sich nunmehr:

$$E_1 = 0{,}367\ E = 0{,}0074\, D^3\, \pi \left[\left(\frac{\delta}{D} \right)^2 - 0{,}14 \left(\frac{\delta}{D} \right) + 0{,}01 \right]$$
$$E_2 = 0{,}509\ E = 0{,}0100\ \text{»} \qquad \text{»} \qquad \text{»}$$
$$E_3 = 0{,}491\ E = 0{,}0100\ \text{»} \qquad \text{»} \qquad \text{»}$$

Diese Gleichungen zeigen ferner, dass bei dem vollständig verlaufenden Durchstofsvorgange das Kick'sche Gesetz der proportionalen Widerstände keine vollkommene Giltigkeit hat. Es wäre dies der Fall, wenn man in der Gleichung für den Arbeitsaufwand des 3. Diagrammabschnittes die Mittelwerte

$$k_3 = 1{,}31\, k \text{ konst.}$$
und
$$s = 0{,}33\, \delta$$

eingesetzt hätte. In diesem Falle würde man erhalten:

$$E_3 = k_3 D \pi (\delta \sigma - {}^1/_2 \sigma^2)_{\sigma = 0{,}33\,\delta}^{\sigma = \delta}$$

$$= 0{,}225\, k_3 D \pi \delta^2 = 0{,}300\, k D \pi \delta^2,$$

somit auch

$$E = \frac{E_3}{0{,}491} = 0{,}612\, k D \pi \delta^2 = 0{,}612\, P_1 \delta .$$

Dieser letztere Wert würde dann auch die von Kick gemachte Annahme rechtfertigen, dass der Höchstdruck P_1 durch etwa $^2/_3$ der Blechdicke wirken würde.

5. Einfluss der Geschwindigkeit auf den Verlauf des Vorganges.

Die vorbesprochenen Versuche wurden alle unter Einhaltung der bei der vorhandenen Antriebsanlage kleinstmöglichen Geschwindigkeit durchgeführt, bei welcher der Stempelweg von 1 mm in 80 bis 90 Sekunden zurückgelegt wird. Bei wirklich — in Werkstätten — vorkommenden Durchstofsarbeiten ist thatsächlich der Vorgang in wenigen Sekunden, ja sogar in Bruchteilen einer Sekunde, zu Ende. Es war natürlich zu vermuten, dass Höchstdruck und Arbeit bei so raschem Verlaufe, welcher dem Materiale nicht Zeit zur Verdrängung giebt, wesentlich anders sich herausstellen werden als bei den Versuchen mit geringen Geschwindigkeiten. Es wurden daher — soweit es die benutzte Maschine überhaupt gestattete — Versuche mit steigenden Geschwindigkeiten gemacht, und zwar mit ganz gleich dick bearbeiteten Blechstücken von genau der gleichen Beschaffenheit, und zeigten sich folgende Ergebnisse bei Benutzung eines Stempeldurchmessers von 12 mm

Zeit für 1 mm Stempelweg	188	89	56	24	20 Sek.
Höchstpressung	16500	16750	17010	16870	17720 kg
Arbeitsaufwand	14,14	13,56	14,38	14,44	15,22 kgm.

Es zeigt sich somit eine bedeutende Zunahme der Werte von P_1 und E bei gröfseren Geschwindigkeiten; wie weit diese Werte zunehmen bei den in der That vorkommenden Geschwindigkeiten, lässt sich freilich nicht sagen; doch wird man sicher gut thun, bei Schätzung diese Werte um 10 pCt. höher anzunehmen als sie sich bei den Versuchen ergeben haben.

6. Das Arbeitsdiagramm für den unvollständig verlaufenden Durchstofsvorgang.

Ein unvollständig verlaufender Durchstofsvorgang ergiebt sich dann, wenn in den Arbeitsdiagrammen einer der einzeln betrachteten Abschnitte fehlt. So wird bei sehr plastischen Materialien der 3. Abschnitt, die eigentliche Abscheerung, fehlen und der ganze Vorgang eine Verdrängung sein. Inbezug hierauf sind die bekannten Tresca'schen Versuche über das »Fliefsen fester Körper« zu erwähnen, und findet dieser Verdrängungsvorgang unmittelbare Anwendung bei der Herstellung von Bleiröhren, Thonröhren, Teigwaren u. a. Bei anderen, mehr spröden, Stoffen wird der Verdrängungsabschnitt sich bedeutend verkürzen, ja nahezu vollkommen in Wegfall kommen und anstatt dessen die Abscheerung mehr hervortreten; ja man wird in dem Vergleich der Diagramme für verschiedene Stoffe oder verschiedene Beschaffenheit des gleichen Stoffes ein vorzügliches Mittel finden, die Güte des Stoffes, seine Dehnsamkeit, Zähigkeit und andere Eigenschaften zu erkennen.

Zur Klarstellung dieses letzteren Punktes, d. h. zur Erkennung der Methode, um aus dem Durchstofsdiagramme auf die Beschaffenheit eines Materiales schliefsen oder zweierlei Materialien vergleichen zu können, ist eine besondere Reihe von Versuchen nötig, die ich mir noch vorbehalten habe.

Auch bei einer Anzahl der vorliegenden Versuche haben sich unvollständige Diagramme ergeben, bei denen der Abscheerungsvorgang gänzlich fehlt, indem im Augenblicke des Eintretens der Höchstpressung ein plötzliches Abscheeren des Lochkernes stattfindet, eine plötzliche senkrechte Quertrennung aller Schichten desselben (s. Fig. 51, 52 und 59 und 60 auf Taf. I sowie 46, 47, 54, 55, 56 auf Taf. II und Tabelle V.

Ein solcher Fall tritt jederzeit ein, wenn die Bleche im Verhältnis zu den Stempeldurchmessern geringe Stärken besitzen.

Die aufgewendete Arbeit berechnet sich demgemäfs durch die Gleichung, welche dem Verdrängungsvorgang mit Wegfall des Abscheerungsvorganges entspricht, mithin durch

$$E = E_2 = 0{,}01\, D^3 \pi \left[\left(\frac{\delta}{D} \right)^2 - 0{,}14\, \frac{\delta}{D} + 0{,}01 \right].$$

Bei diesen unvollständig verlaufenden Vorgängen zeigt sich

Tabelle V für unvollständige Durchstofsdiagramme.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
No.	D	δ	$\frac{\delta}{D}$	P_1	$k=\frac{P_1}{D\pi\delta}$	$A=P_1\delta$	s_1	$A_1=P_1 s_1$	$E_1=E$	$E:A_1$	$E:A$	$\Delta=\frac{D_1-D}{2}$	$\frac{\Delta}{\delta}$
	mm	mm		kg	kg/qmm	kgm	mm	kgm	kgm			mm	
52	12,0	2,7	0,225	4000	39,3	10,8	0,80	3,2	2,6	0,825	0,337	0,35	0,13
51	»	3,7	0,308	5150	36,9	19,0	0,75	3,9	3,5	0,902	0,180	»	0,09
47	15,0	2,75	0,183	4940	38,0	13,58	0,90	4,4	4,0	0,908	0,297	0,55	0,20
46	»	3,7	0,247	5915	33,8	21,88	0,85	5,0	4,3	0,871	0,196	»	0,15
60	18,0	2,65	0,147	5680	37,9	15,05	1,05	6,0	5,1	0,849	0,336	0,60	0,23
59	»	3,75	0,208	7125	35,2	26,71	1,00	7,1	5,5	0,772	0,206	»	0,16
58	»	6,25	0,347	11600	32,8	72,5	1,20	13,4	11,7	0,871	0,161	»	0,10
56	20,8	2,7	0,129	6650	37,7	17,9	0,95	6,3	5,2	0,816	0,287	0,70	0,26
55	»	3,8	0,182	8300	33,4	31,5	0,95	7,9	6,1	0,779	0,194	»	0,19
54	»	6,15	0,296	13540	33,7	83,3	1,25	16,9	14,3	0,845	0,172	»	0,12

aber auch der Einfluss des Verhältnisses zwischen Stempelgröfse und Durchmesser der Matrizenöffnung bezw. des Spielraumes zwischen diesen beiden. Tresca hat diesem Einflusse die Verminderung der Höhe des Lochkernes zugeschrieben, während nach den vorliegenden Versuchen diese Verminderung oder scheinbare Zusammenpressung nur durch das seitliche Ausweichen, Abfliefsen, des Materials erfolgt, welches nicht nur in der Richtung gegen die Matrize, sondern auch nach der Seite hin zu beobachten ist. Bezeichnet man jenen Spielraum mit Δ, den Durchmesser der Matrizenöffnung mit D_1, so ist zu setzen $\Delta = {}^1/_2 (D_1 - D)$, und kann aus den Versuchen klar ersehen werden, dass mit abnehmenden Blechstärken von einer gewissen Grenze an die Arbeitsgleichung gröfsere Ergebnisse liefern muss, bezw. einen Korrekturkoëffizienten f erhält, welcher sich bestimmen lässt durch die Gleichung

$$f = \frac{\frac{\delta}{\Delta} - 1{,}5}{\frac{\delta}{\Delta} - 2{,}4}$$

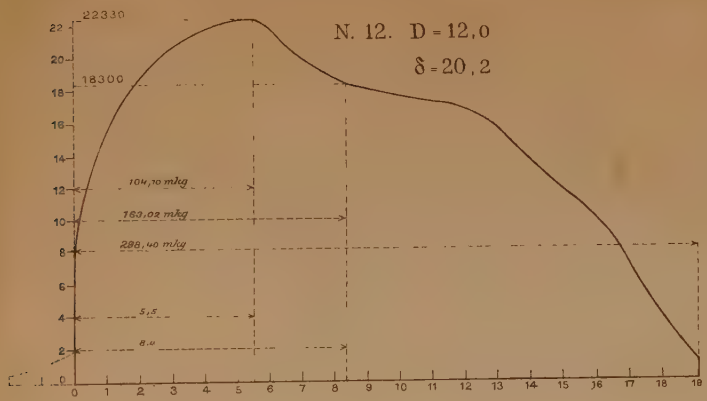
und die Werte annimmt

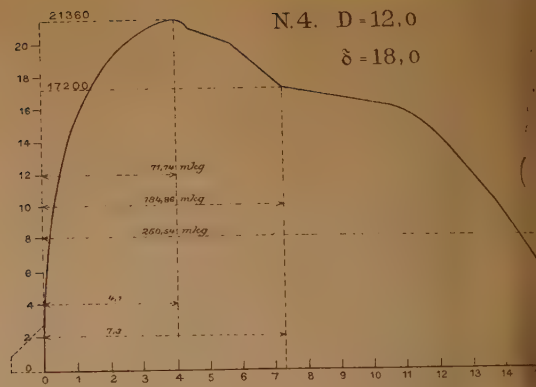
für $\frac{\delta}{\Delta} =$	100	50	20	10	6,7	5,0	4,0	3,3	2,9	2,5
$\frac{\Delta}{\delta} =$	0,01	0,02	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40
$f =$	1,009	1,019	1,05	1,12	1,21	1,35	1,56	2,00	2,80	10.

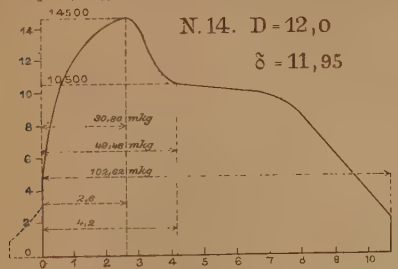
Wie man sieht, nähert sich mit abnehmendem Spielraume der Korrekturkoëffizient immer mehr der Einheit, wächst aber mit zunehmendem Spielraum sehr bedeutend, so dass bei einem Verhältnis $\frac{\delta}{\Delta} = 2{,}4$ $f = \infty$ würde, d. h. überhaupt kein eigentlicher Durchstofs mehr stattfände. Für den unvollständigen Durchstofs ist mithin der Arbeitsaufwand zu rechnen nach der Gleichung

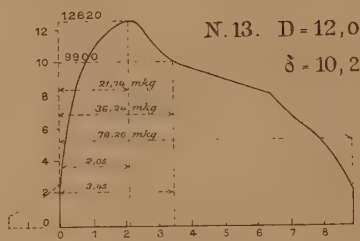
$$E = 0{,}01\, D^3 \pi \left[\left(\frac{\delta}{D}\right)^2 - 0{,}14\left(\frac{\delta}{D}\right) + 0{,}01\right] f$$

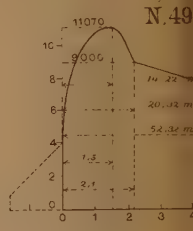
und ist es sowohl im Interesse der Erzielung eines schöneren Produktes, d. h. einer glatten Lochung ohne umgebogene Ränder, als auch behufs Verminderung des Arbeitsaufwandes wünschenswert, den Spielraum Δ möglichst klein, jedenfalls nicht über ${}^1/_{10} D$ zu machen.

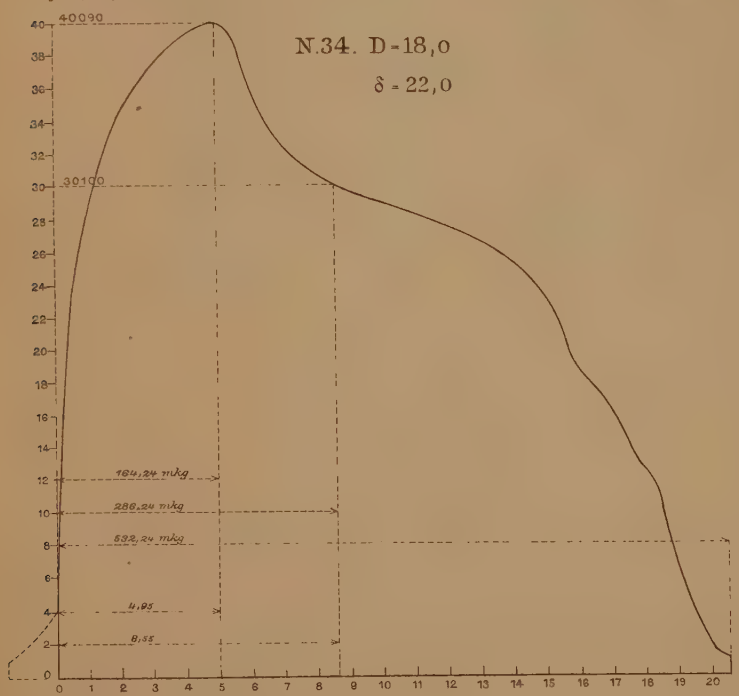

N. 12. D = 12,0
δ = 20,2
22330
18300
104,70 mkg
163,02 mkg
288,40 mkg
5,15
8,40

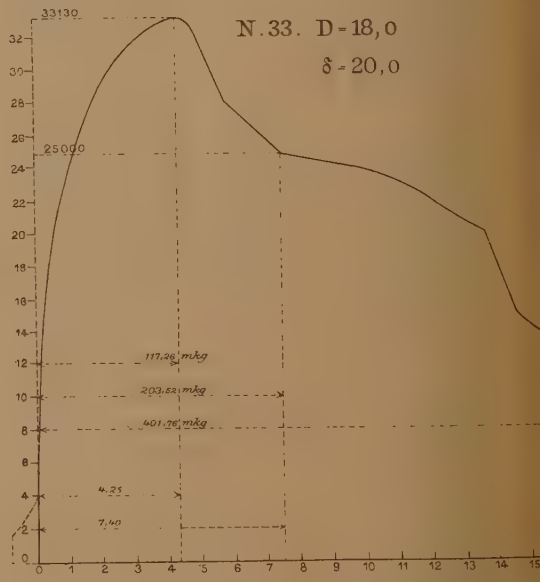

N.4. D = 12,0
δ = 18,0
21360
17200
71,74 mkg
184,86 mkg
260,54 mkg
4,1
7,3

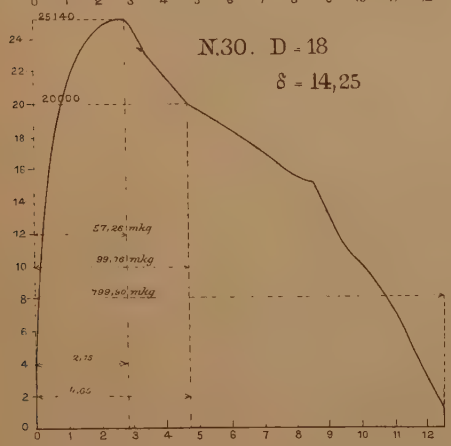

N.14. D = 12,0
δ = 11,95
14500
10500
30,86 mkg
49,46 mkg
103,82 mkg
2,6
4,2

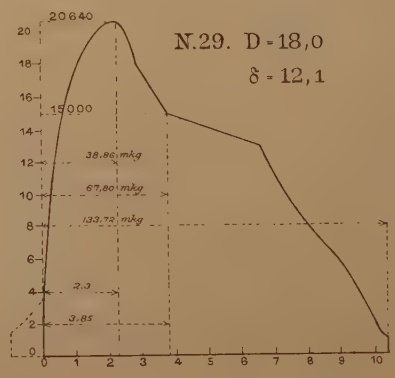

N.13. D = 12,0
δ = 10,2
12620
9900
21,74 mkg
36,24 mkg
78,26 mkg
2,05
3,45

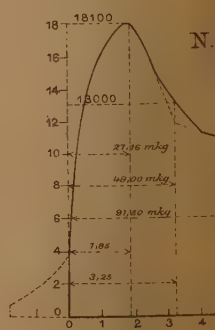

N.49
11070
9000

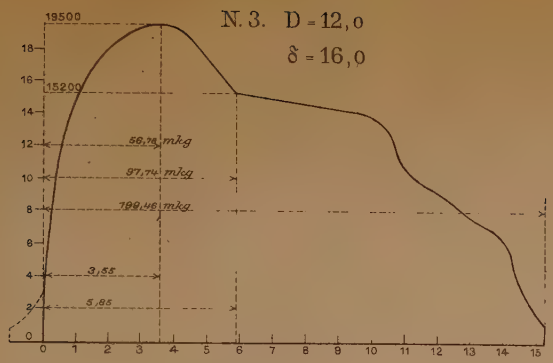

N.34. D = 18,0
δ = 22,0
40090
30100
184,24 mkg
286,24 mkg
532,24 mkg
4,95
8,35

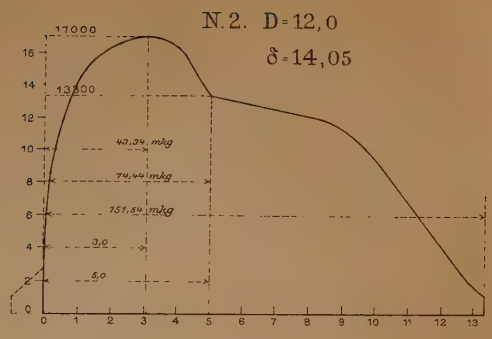

N.33. D = 18,0
δ = 20,0
33130
25000
117,26 mkg
203,52 mkg
401,76 mkg
4,25
7,40

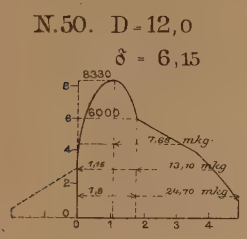

N.30. D = 18
δ = 14,25
25140
20000
57,26 mkg
99,76 mkg
199,50 mkg
2,75
4,65

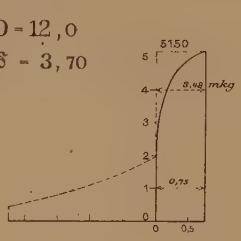

N.29. D = 18,0
δ = 12,1
20640
15000
38,86 mkg
67,80 mkg
133,72 mkg
2,3
3,85

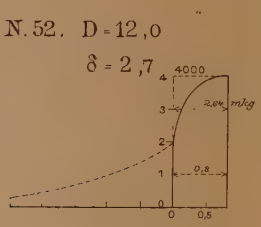

18100
13000
27,95 mkg
49,00 mkg
91,50 mkg
1,85
3,25

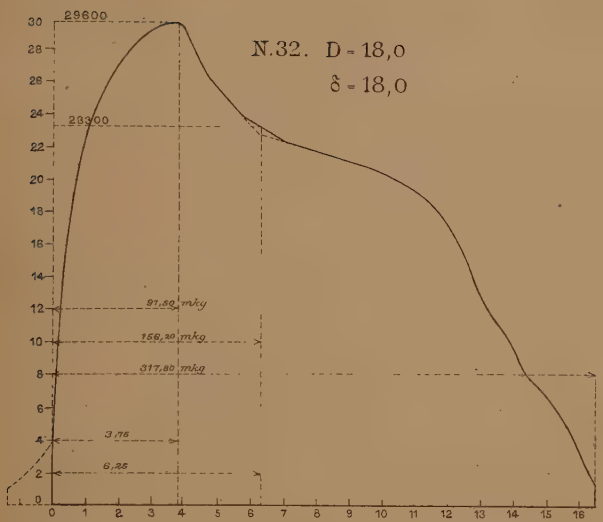


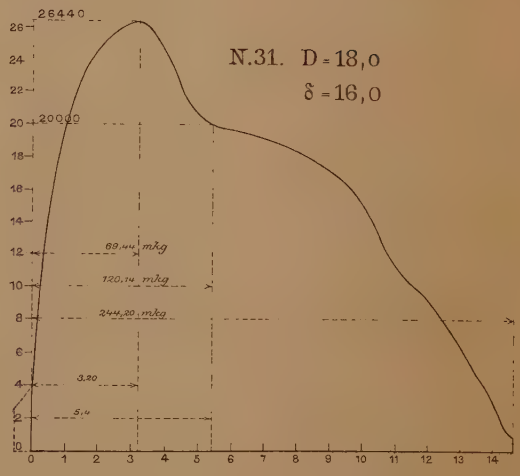


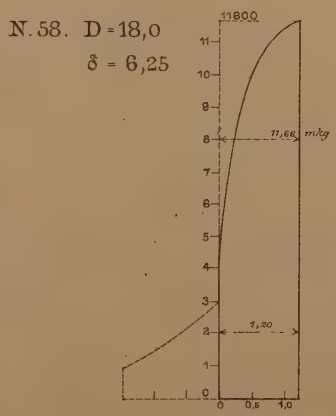


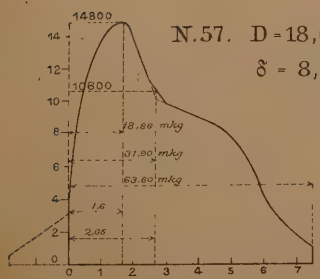


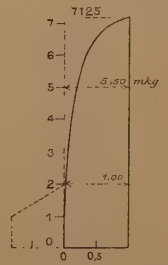


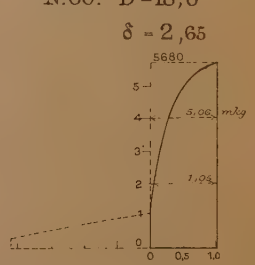




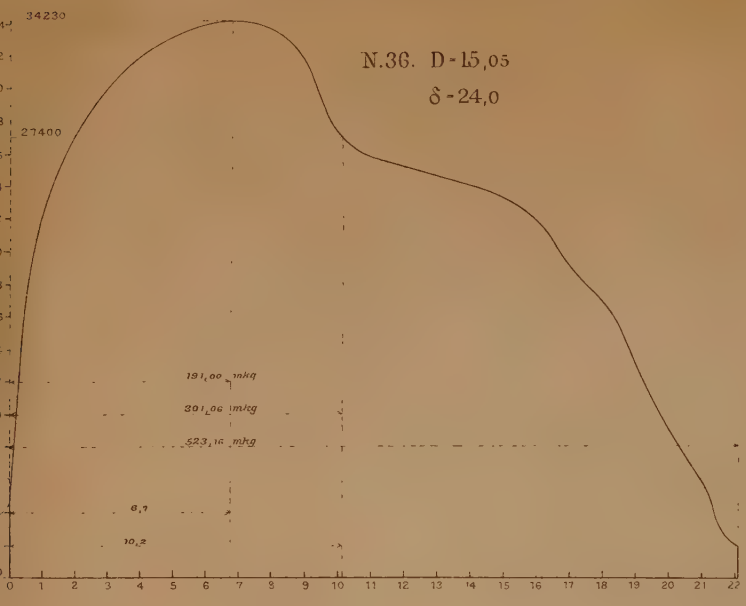


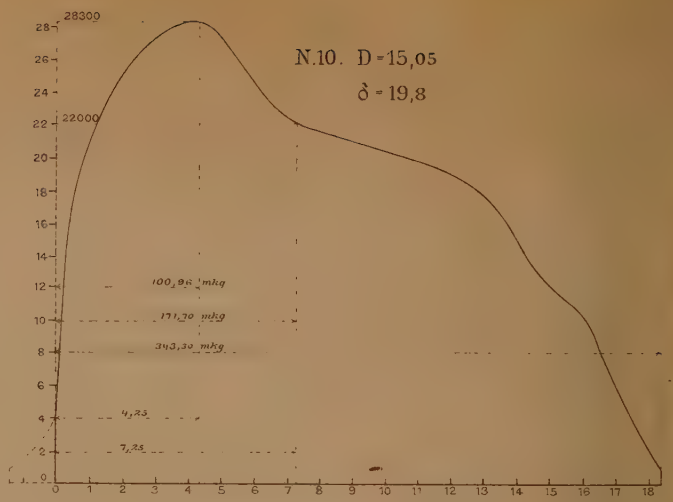


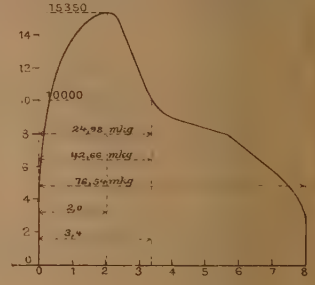


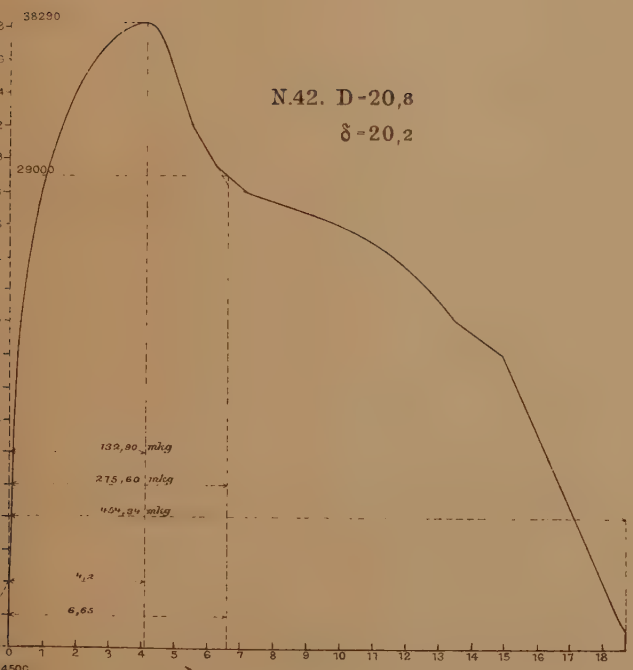


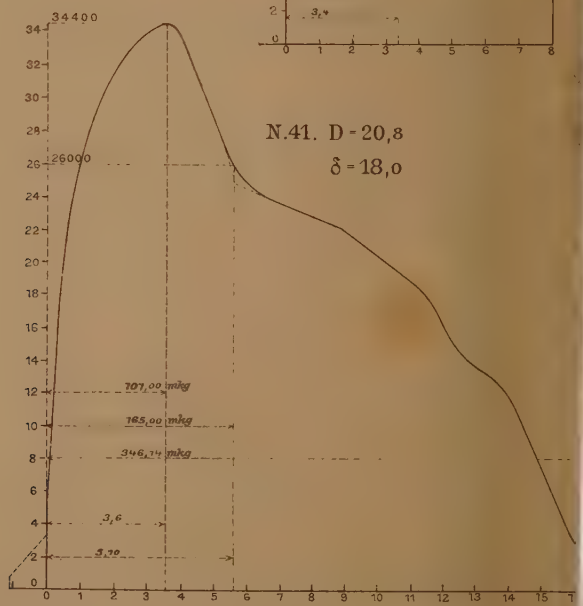
Geogr. lith Anst. u. Steindr. v. C. L. Keller, Berlin. S

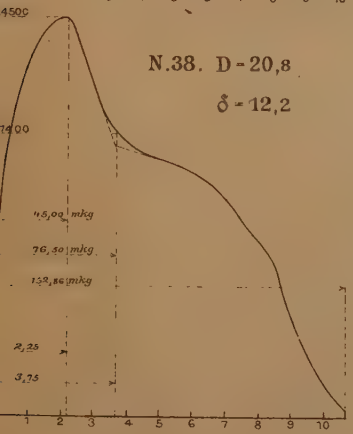

N.36. D = 15,05
δ = 24,0
34230
27400
191,00 mkg
301,06 mkg
523,16 mkg
6,7
10,2

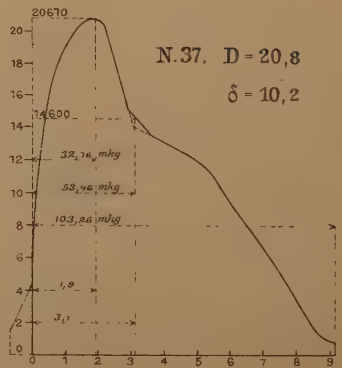

N.10. D = 15,05
δ = 19,8
28300
22000
100,96 mkg
171,20 mkg
343,30 mkg
4,23
7,25


N.6. D = 15,00
δ = 10,15
15350
10000
24,98 mkg
42,66 mkg
76,34 mkg
2,0
3,4


N.42. D = 20,8
δ = 20,2
38290
29000
132,90 mkg
275,60 mkg
454,34 mkg
4,2
6,65

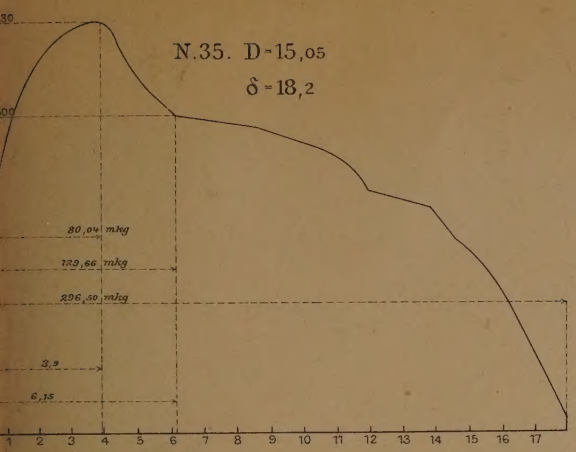

N.41. D = 20,8
δ = 18,0
34400
26000
107,00 mkg
185,00 mkg
346,14 mkg
3,6
5,70


N.38. D = 20,8
δ = 12,2
4500
45,00 mkg
76,30 mkg
152,86 mkg
2,25
3,75

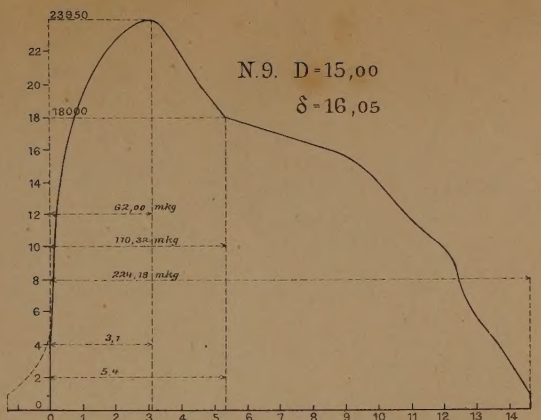

N.37. D = 20,8
δ = 10,2
20670
14600
32,76 mkg
53,46 mkg
103,26 mkg
1,9
3,1

stofsen von Metallen.

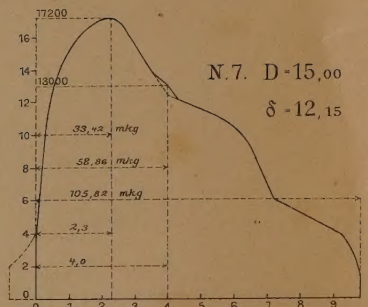
N.35. D=15,05
δ=18,2



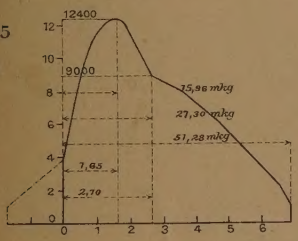
N.9. D=15,00
δ=16,05



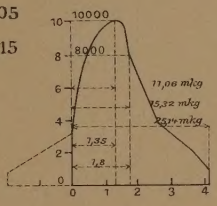
N.7. D=15,00
δ=12,15



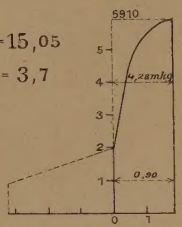
=15,05
= 8,7



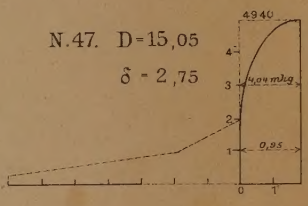
N.45. D=15,05
δ = 6,15



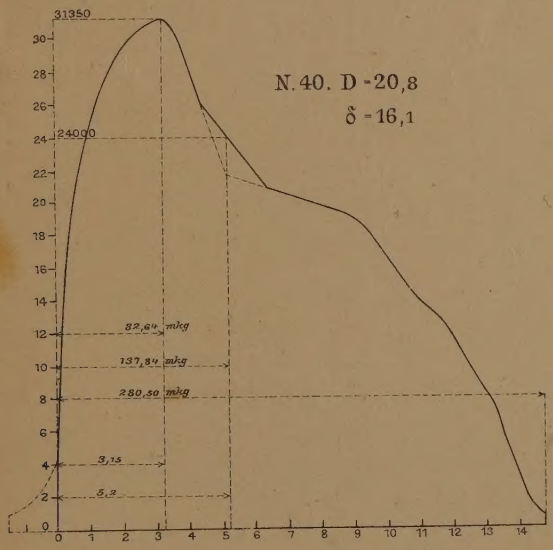
N.46. D=15,05
δ = 3,7



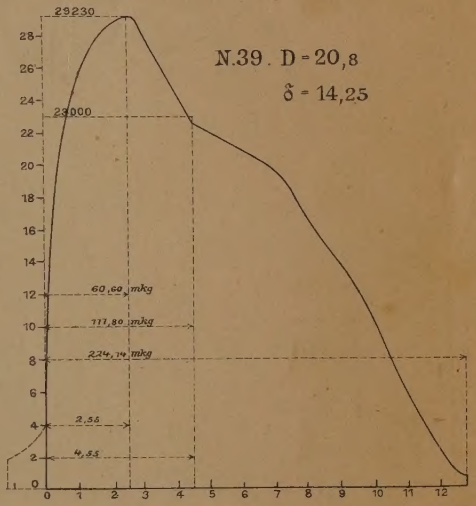
N.47. D=15,05
δ = 2,75



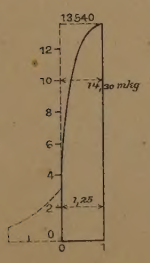
N.40. D=20,8
δ=16,1



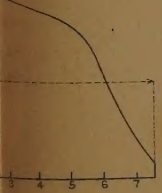
N.39. D=20,8
δ = 14,25



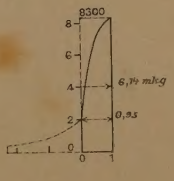
N.54. D=20,8
δ = 6,15



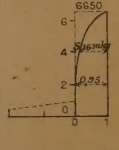
N.53. D=20,8
δ = 8,65



N.55. D=20,8
δ = 3,8



N.56. D=20,8
δ = 2,7



Geogr. lith. Anst. u. Steindr. v. C. L. Keller, Berlin, S.